

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

TENKOVSTVÉ GEOPOLYMERNÍ OMÍTKY PRO VNĚJŠÍ POUŽITÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JANA SEKANINOVÁ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

TENKOVSTVÉ GEOPOLYMERNÍ OMÍTKY PRO VNĚJŠÍ POUŽITÍ

THIN-FILM GEOPOLYMERIC PLASTERS FOR EXTERIOR APPLICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JANA SEKANINOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK ŠOUKAL, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0680/2011	Akademický rok: 2011/2012
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Jana Sekaninová	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. František Šoukal, Ph.D.	
Konzultanti:	Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.	

Název bakalářské práce:

Tenkovrstvé geopolymerní omítky pro vnější použití

Zadání bakalářské práce:

1. Literární rešerše.
2. Příprava tenkovrstvých omítek z alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů s vhodnými modifikátory reologie.
3. Stanovení vlivu použitých modifikátorů reologie na zpracovatelnost a výsledné mechanické vlastnosti omítek.
4. Charakterizace struktury vytvrzených omítek.

Termín odevzdání bakalářské práce: 4.5.2012

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Jana Sekaninová
Student(ka)

Ing. František Šoukal, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2012

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou venkovních tenkovrstvých geopolymerních omítek, u kterých je zkoumán vliv přidavku různých typů superplastifikátorů v jejich různém množství na vlastnosti geopolymerních omítek. Cílem této práce je určit vyhovující typ superplastifikátoru, který by zlepšil reologické vlastnosti čerstvé omítkové směsi, dále její přilnavost na povrch a v neposlední řadě zachoval dobré mechanické vlastnosti geopolymerního pojiva.

V experimentální části byly nejprve připraveny trámečky z metakaolinu, vody, vodního skla, písku a s přidavkem různých typů superplastifikačních přísad v různých množstvích. Tyto trámečky byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a tlaku. Dále byla sledována zpracovatelnost a přilnavost k povrchu těchto omítkových past. Geopolymerní pasty byly také podrobeny kalorimetrickému porovnávání kinetických dějů probíhajících během tuhnutí a tvrdnutí. K zjištění složení superplastifikátorů použitých jako reologické modifikátory, byla provedena infračervená spektrometrie těchto látek. Stejně tak bylo zapotřebí blíže specifikovat vodní sklo, byla na něm tedy provedena prvková analýza na rentgenové fluorescenční spektrometrii. Pro bližší prozkoumání struktury a rozložení superplastifikátoru v geopolymerním betonu byly zhotoveny snímky na skenovacím elektronovém mikroskopu jednoho ze vzorků. U stejného vzorku byla provedena i Rentgenová difrakce na práškových vzorcích, která sloužila pro fázovou analýzu.

Klíčová slova: Geopolymery, alkalická aktivace, omítky, superplastifikátory

Abstract

This thesis is dealing with preparation of exterior thin-layer geopolymer plaster where the effect of supplement of various types of superplasticizers in their different amounts on the quality of geopolymer plaster is studied. The objective of this work is to determine suitable type of superplasticizer which would improve rheological quality of fresh plaster mix, its adhesion to the surface and last but not least would preserve good mechanical qualities of geopolymer binder.

In the experimental part initially test subject were prepared from meta-kaolin, water, water-glass, sand and with supplement of various types of superplasticizers in various amounts. These test subjects were tested for compressive and flexural strength. Further workability and adhesion to the surface of these plaster pastes was observed. Geopolymer pastes were also subjected to calorimetric comparison of kinetic processes occurring during solidification and hardening. In order to identify the exact composition of superplasticizers used as rheological modifiers, the infra-red spectrometry of these substances was performed. There was a need to specify the water-glass in more detail as well, elemental analysis was performed on it on radiographic fluorescent spectrometry. To closer identify the structure and distribution of superplasticizer in geopolymer paste the pictures of the mix which appeared to be the most suitable for use for exterior thin-layer geopolymer plasters were made on scanning electron microscope. On the same mix radiographic diffraction on the powder samples was also performed which served for phase analysis.

Key words: Geopolymers, alkali activation, plaster, superplasticizers

SEKANINOVÁ, J. *Tenkvrstvé geopolymerní omítky pro vnější použití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Šoukal, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně a všechny použité literární zdroje byly správně a úplně citované. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využívána ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího práce a děkana FCH VUT.

.....

Podpis studenta

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Františkovi Šoukalovi Ph.D. za konzultace a rady při práci. Také bych ráda poděkovala Ing. Lukášovi Kalinovi Ph.D. za pomoc při experimentální části této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1.1 Geopolymery.....	8
1.1.1 Obecná charakteristika Geopolymerů.....	8
1.1.2 Historie geopolymérů.....	8
1.1.3 Využití geopolymérů.....	8
1.1.4 Vlastnosti geopolymérů.....	8
1.1.5 Struktura geopolymérů.....	8
1.1.6 Mechanismus geopolymérace.....	11
1.1.7 Materiály pro alkalickou aktivaci.....	12
1.1.8 Alkalické aktivátory.....	13
1.1.9 Výkvěty.....	14
1.2 Omítky.....	14
1.2.1 Anorganická plniva.....	14
1.2.2 Anorganická pojiva.....	15
1.2.3 Omítky hliněné.....	15
1.2.4 Omítky ze sádry a sádrovin.....	15
1.2.5 Omítky z hořečnaté maltoviny.....	15
1.2.6 Omítky vápenné ze vzdušného vápna.....	16
1.2.7 Omítky z hydraulického vápna.....	16
1.2.8 Omítky cementové.....	16
1.3 Superplastifikátory.....	16
1.3.1 Mechanismus dispergace cementových past.....	18
1.3.2 Vliv ζ -potenciálu na množství naadsorbovaného superplastifikátoru na cementové fáze.....	18
1.3.3 Retardační efekt superplastifikátorů.....	19
1.3.4 Závislost adsorpce superplastifikátoru na pH u materiálů nahrazujících cement.....	19
1.3.5 Typy superplastifikátorů.....	19
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	23
2.1 Použité suroviny.....	23
2.2 Infračervená spektrometrie.....	23
2.2.1 Příprava vzorků.....	23
2.3 Rentgenová fluorescenční spektrometrie.....	24
2.3.1 Příprava vzorku.....	24
2.4 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.....	24
2.4.1 Příprava vzorků geopolymerních betonů.....	24

2.4.2	Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku	25
2.5	Nanášení geopolymerních omítek na podklad	25
2.6	Isoperibolická kalorimetrie	26
2.6.1	Příprava geopolymerních past.....	26
2.7	Skenovací elektronová mikroskopie	26
2.7.1	Příprava vzorku	27
2.8	Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích	27
2.8.1	Příprava vzorku	27
3	VÝSLEDKY A DISKUZE	28
3.1	Charakterizace superplastifikátorů infračervenou spektrometrií	28
3.2	Charakterizace vodního skla rentgenovou fluorescenční spektrometrií	31
3.2.1	Výpočet vodního součinitele.....	32
3.2.2	Výpočet silikátového modulu	32
3.3	Pevnosti omítek.....	33
3.4	Zpracovatelnost a nanášení omítek na podklad	40
3.5	Stanovení vlivu superplastifikátoru na průběh tuhnutí a tvrdnutí geopolymerních past	45
3.6	Určení struktury a prvkové složení geopolymerního betonu s přídavkem s uperplastifikátoru Optima 100	45
3.7	Rentgenová difraktometrie geopolymerní pasty s superplastifikátoru Optima 100.....	49
3.8	Infračervená spektrometrie vyluhovaného superplastifikátoru Optima 100.....	50
4	ZÁVĚR.....	51
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53

ÚVOD

Už dlouhá léta je nejpoužívanější stavební hmotou portlandský cement. S obrovským nárůstem spotřeby tohoto materiálu jde i ruku v ruce ohromná zátěž životního prostředí těžbou výchozích surovin, spotřebou energetických zdrojů na jejich zpracování a v neposlední řadě i ohromným množstvím produkovaného oxidu uhličitého. Proto se vědci snaží nalézt vhodnou náhradu, která by splňovala potřebné parametry pro použití jako stavební materiál a zároveň by její výrobou byla snížena zátěž na životní prostředí.

Jednou ze současných možností jsou geopolymerní materiály. Hodně diskutovaná výhoda těchto materiálů, oproti klasickému portlandskému cementu, je možnost využití vedlejších surovin obsahující aktivní hlinitokřemičitany jako hlavní složku pojivového systému. Jedná se hlavně o popílky a strusky. Využitím těchto odpadních surovin, které nejsou energeticky ani technologicky náročné na zpracování, nám klesá cena geopolymerních pojiv oproti portlandskému cementu. Touto cestou se dostáváme k další výhodě, a to k šetrnosti vůči životnímu prostředí.

Tak, jako se dají využít tyto vedlejší produkty, je možné využít i přírodní zdroje, jako je například kaolín, či metakaolin vznikající jeho kalcinací.

Tato bakalářská práce se zabývá využitím geopolymerních pojiv z metakaolinu jako tenkovrstvé omítky pro vnější použití. Konkrétně se pak zaměřuje na ovlivnění vlastností pojivového systému přidáním různých druhů reologických modifikátorů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Geopolymery

1.1.1 Obecná charakteristika Geopolymerů

Geopolymery jsou anorganické polymerní materiály, které vznikají alkalickou aktivací aluminosilikátových materiálů a následnou polykondenzační reakcí (geopolykondenzací) hliníku a křemíku. Polymerace probíhá za pokojové teploty a nízkého pH, jejím výsledkem je tetragonální struktura jednotek Al-O a Si-O tvořící nepravidelnou 3D síť obklopenou alkalickými ionty. Materiály bohaté na hliník a křemík jsou například metakaolin, kaolinit, vysokopecní struska, slévárenská struska, ocelárenská struska, fluidní popílek aj. [1] Pojem „geopolymer“ byl poprvé použit francouzským chemikem Josephem Davidovitem v roce 1979. [2]

1.1.2 Historie geopolimerů

Historii geopolimerů lze rozdělit do dvou etap. První tvoří období starých civilizací, které hojně využívaly alkalicky aktivované materiály pro své stavby a tvorbu uměleckých předmětů. [3] Snad nejznámější objekty vytvořené z geopolymerních materiálů jsou egyptské pyramidy. Tuto hypotézu pronesl již v roce 1974 profesor J. Davidovits na egyptologickém kongresu v Lyonu. [4]

Novodobý výzkum v oblasti výroby alkalicky aktivovaných pojiv probíhá již od roku 1939. V roce 1959 navrhl Glukhovskij možnost používání nových materiálů, které nazval soil cements. Byly to výsledky reakce mezi přírodními hlinitokřemičitanovými materiály, nebo vedlejšími produkty a alkalickými systémy. Dalším mezníkem v oblasti geopolimerů byl rok 1978, ve kterém profesor Joseph Davidovits vyvinul pojiva získaná alkalickou aktivací metakaolinu. Tyto cementy nazval právě geopolymery. Další důležitou osobností v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů je profesor Krivenko. Na základě bádání Glukhovského studoval mechanismus, který řídí proces formování struktury v alkalických cementech. Malinowsky, Langton a Roy sledovali v osmdesátých letech trvanlivost starověkých staveb v Itálii, Řecku a v Egyptě. [3]

1.1.3 Využití geopolimerů

Geopolymery jsou poměrně nové materiály, které se svými vlastnostmi podobají portlandskému cementu. [1] Své možné využití zatím nacházejí hlavně ve stavebnictví. Ale své uplatnění si hledají například i v letectví, automobilovém průmyslu či při výrobě lodí a ponorek. [5]

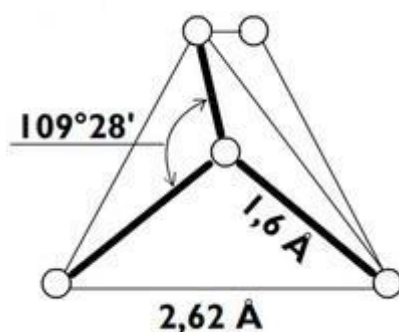
1.1.4 Vlastnosti geopolimerů

Chemické vazby Si-O a Al-O patří mezi nejstálější kovalentní vazby v přírodě a ve spojení s vysokým polykondenzačním stupněm vynikají geopolymery v mnoha vlastnostech. [6] Řadí se mezi ně například vysoká tvrdost, pevnost a odolnost vůči vysokým teplotám (nad 1000 °C). [1] Jejich základní báze je schopna akceptovat a uzavírat do polymerní sítě řadu dalších materiálů, čehož se využívá v odpadovém hospodářství. [7]

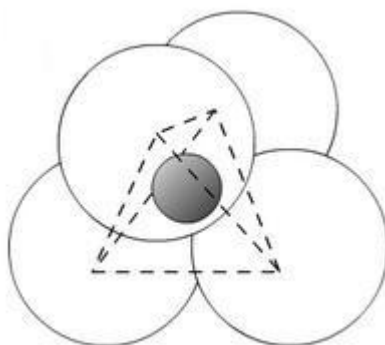
1.1.5 Struktura geopolimerů

Struktura geopolimerů je amorfní až semikrystalická či polykrystalická, a to převážně u produktů syntetizovaných za vyšší teploty. [8] Základními jednotkami tvořící geopolymerní

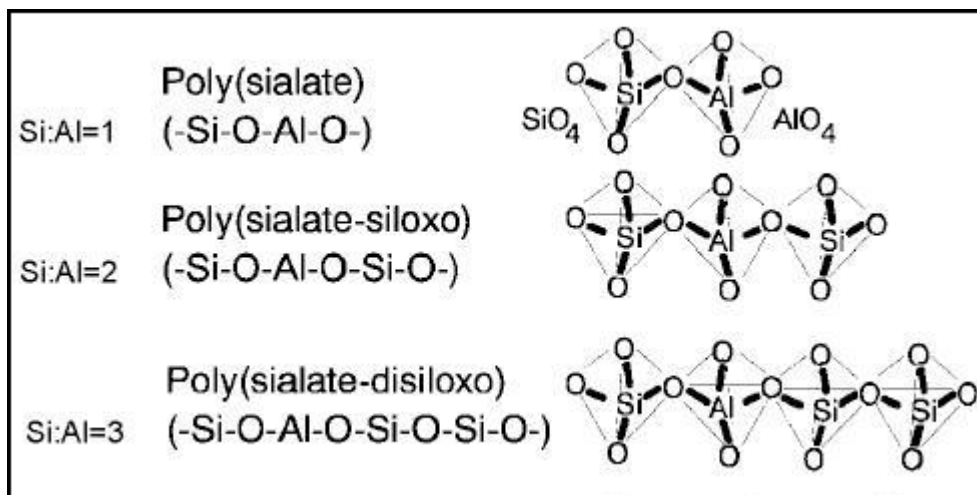
řetězec jsou tetraedrální ionty $[\text{SiO}_4]^{4-}$ a $[\text{AlO}_4]^{5-}$. Tyto sloučeniny navzájem sdílí kyslíkový atom a tvoří tak polysialátovou síť. Pojem sialát vychází ze slovního spojení silicon-oxo-aluminate (oxid hlinitokřemičitanu), tedy sialate. [1] Záporný náboj vycházející z kationtu hliníku, který se zde vyskytuje v koordinačním čísle IV, je kompenzován alkalickými kationty volně se vyskytujícími v polysiliátové síti (Na^+ a/nebo K^+). [9] Dle Davidovitse [10] bylo identifikováno několik základních typů polysiliátových jednotek: sialáty $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-]$, sialát siloxany $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-]$ a sialát disiloxany $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-]$. Sialát siloxanová jednotka je považována za kondenzační výsledek orthosialátu s kyselinou orthokřemičitou. Sialát disiloxan vzniká kondenzací orthosialátu se dvěma $\text{Si}(\text{OH})_4$. [11]



Obrázek 1: Schematické znázornění tetraedru $[\text{SiO}_4]$ [12]



Obrázek 2: Schematické znázornění téhož tetraedru s reálným poměrem ve velikosti [12]

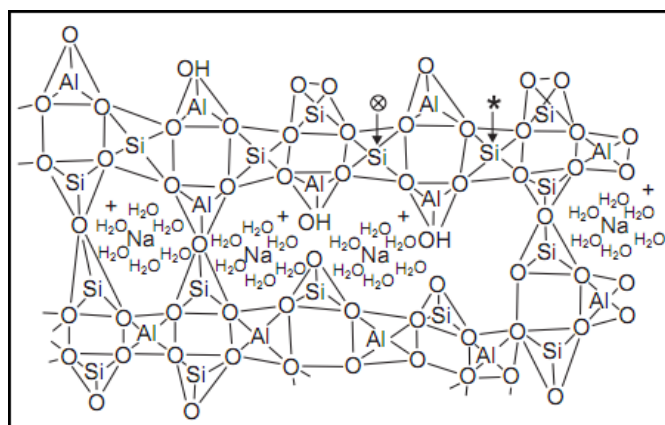


Obrázek 3: Struktury několika základních typů polysiliátových jednotek [13]

Obecný zápis polysialátů vystihuje vzorec $M_n\{-(\text{Si-O})_z-\text{Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, kde z vyjadřuje poměr $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, M je kationt alkalického kovu a n je stupeň polykondenzace. [14]

Geopolymerní struktura se dá obecně charakterizovat v několika bodech:

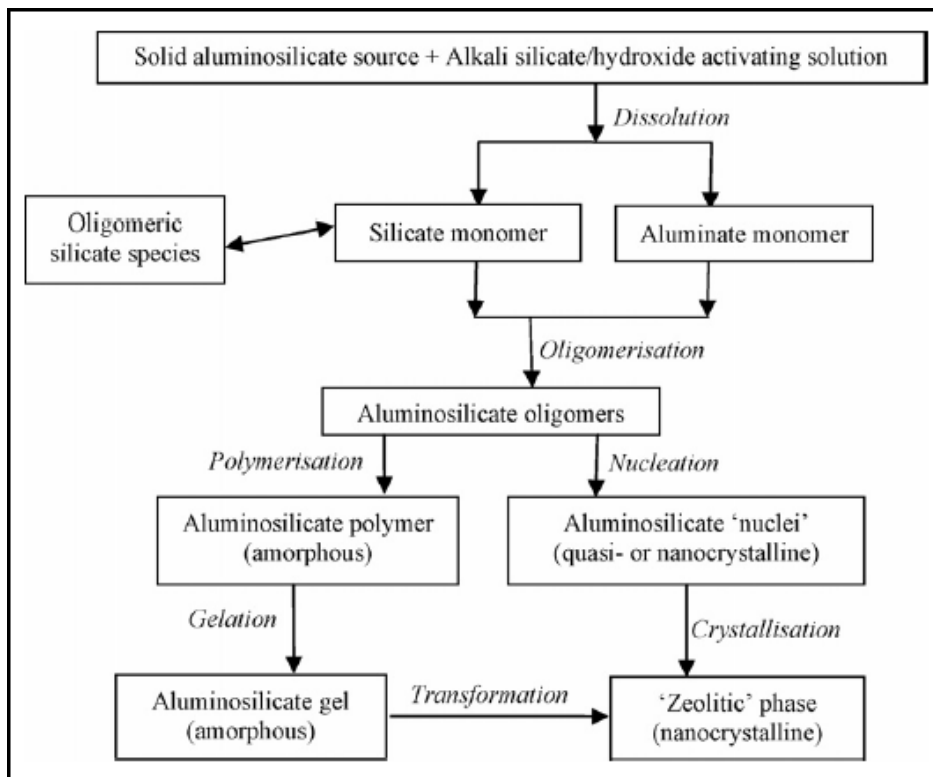
- nema monolitickou strukturu typu polysialát-siloxo;
- alkalické kationty (Na^+ , K^+) přítomné ve struktuře geopolymerů vystupují v solvované formě, to je ukázáno na *Obrázku 4*;
- geopolymery jsou nejlépe charakterizovány nepravidelnou 3D sítí;
- jejich struktura je pórovitá, s velikostí pórů v řádech nanometrů až mikrometrů;
- voda přítomná ve struktuře geopolymerů se vyskytuje buďto v pórech nebo v geopolymerním gelu;
- voda hraje roli rozpouštědla alkalických aktivátorů a dále také zlepšuje reologické vlastnosti;
- v geopolymerní struktuře se krystalické či amorfni hydráty vyskytují pouze ojediněle a to pouze v přítomnosti materiálů obsahující Ca^{2+} ionty. [15]



Obrázek 4: Barbošův model geopolymerní struktury [15]

1.1.6 Mechanismus geopolymery

Geopolymery jsou připravovány za normální nebo zvýšené teploty alkalickou aktivací aluminosilikátů. [8] Mechanismus zesítnění a tuhnutí geopolymerních materiálů stále ještě není zcela objasněn, stejně jako není popsána reakční kinetika. Avšak je známo, že geopolymerní novotvary vznikají z roztoků, kdy prvním krokem reakčního mechanismu je rozklad základního aluminosilikátu – převedení jeho podstatné části do roztoku, poté následuje polykondenzace vzniklých křemičitanových a hlinitanových tetraedrů. [14]



Obrázek 5: Schematické znázornění reakčního mechanismu geopolymeryzačního procesu [16]

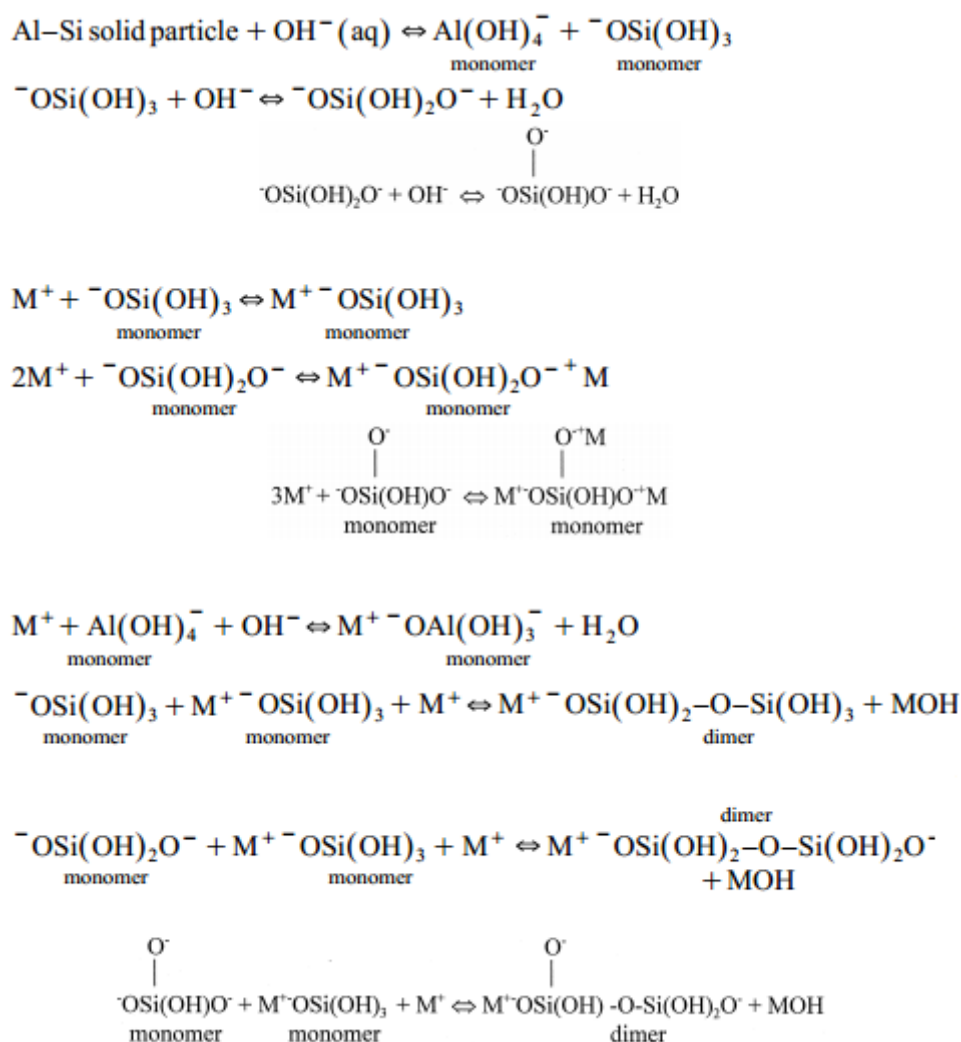
1.1.6.1 Alkalická aktivace

Alkalická aktivace se nejčastěji provádí vysoce koncentrovaným roztokem hydroxidu alkalického kovu nebo křemičitanu (vodního skla). Rozklad trojrozměrné struktury výchozích aluminosilikátů probíhá poměrně rychle při pH 13 – 14. Nejprve dojde k hydrolýze pevného povrchu aluminosilikátu výměnou iontů H^+ s kationty alkalických kovů (Na^+ a K^+) z roztoku. Následuje rozpouštění aluminosilikátových prekurzorů rozbitím kovalentních vazeb Si-O-Si a Si-O-Al tetraedrů SiO_4 a AlO_4 . Dojde tak ke vzniku reaktivních $[SiO(OH)_3]^-$ a $[Al(OH)_4]^-$ iontů v roztoku:



1.1.6.2 Geopolymerní kondenzace

Po alkalické aktivaci následuje polykondenzace vzniklých hydratovaných iontů. Ty se navzájem prováží přes atomy kyslíku na vrcholech tetraedrů do trojrozměrné geopolymerní struktury amorfního gelu, který následně tuhne v geopolymery. [14] Vznikající pevná látka anorganického polymeru vychází ze soustavy sol-gel.



Obrázek 6: Předpokládaný mechanismus rozpouštění a následné kondenzace hlinitokřemičitých materiálů [18]

1.1.7 Materiály pro alkalickou aktivaci

Výchozí materiály používané pro přípravu geopolymérů mohou být definovány jako sloučeniny nebo směs více sloučenin, které jsou schopny reagovat s vodou a hlavně s aktivátorem. [1] Jsou to převážně sloučeniny obsahující hliník a křemík v amorfni formě. [11] Mohou to být materiály přírodního charakteru (metakaolín, kaolinit) nebo syntetické materiály, tedy velkooběmově produkované průmyslové druhotné suroviny (strusky, popílky). [19] Obecně lze také říct, že kalcinované materiály vykazují při geopolymerizaci rychlejší rozpustnost a gelaci, také mechanické pevnosti jsou zde vyšší a jejich vývoj je rychlejší, než u hydratovaných materiálů. [20]

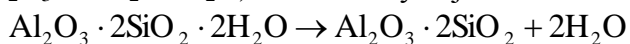
1.1.7.1 Kaolinit

Kaolinit je levný a dostupný aluminosilikátový materiál, [6] který je základní složkou kaolinu. [21] Tvoří ho destičky hexagonálního tvaru o velikosti 0,1 – 3 μm a tloušťce 0,05 μm. [22] Struktura kaolinitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se skládá z přibližně 50 silikátových vrstev, které jsou navzájem spojeny vodíkovými vazbami a van der

Waalsovými interakcemi. Jednotlivé vrstvy jsou tvořeny tetraedrickými SiO_4 a oktaedry, které obsahují Al^{3+} ion. [23]

1.1.7.2 Metakaolin

Metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) je reaktivní metastabilní jíl bílých až růžových odstínů. Chemicky se jedná o bezvodý hlinitokřemičitan získaný kalcinací kaolinu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a kaolinických jílů v rozmezí teplot 650 – 800 °C [3]:



Během kalcinace dochází k odstranění vody z krystalové mřížky kaolinitu. Tato dehydratace je spojená s vývojem páry, která způsobuje vznik silně porézní struktury metakaolinu vyvolávající jeho reaktivitu. Jeho reaktivita je však ovlivněna dalšími faktory, například zrnitostí sloučeniny, teplotou výpalu metakaolinu a také faktem, že se metakaolin vyskytuje v amorfni formě. [11]

1.1.7.3 Struska

Pojmem struska jsou definovány pevné nekovové výrobky hutní výroby vznikající roztavením hlušiny rud, přísad struskotvorných látek a minerálních podílů z pevných paliv. Vlastnosti jednotlivých druhů strusek se odvíjejí od složení železitých rud, druhu vyráběného železa, popela, koksu a druhu struskotvorné přísady. [24]

Obecně jsou známy tři druhy strusek - vysokopecní struska, ocelářská struska a neželezná struska [17]

1.1.7.4 Popílek

Popílký jsou vedlejší produkty výroby elektrické energie v uhelných elektrárnách zachycené továrními filtry. Jsou to heterogenní jemné prášky obsahující většinou sklovité částice SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO . Obsah skloviny v popílcích je 60 % a více. Základní rozdělení je na popílký z vysokoteplotního spalování a popílký z fluidního spalování. Vysokoteplotní popílký vznikají spalováním uhlí při teplotách mezi 1200 a 1700 °C a fluidní popílký pak při teplotě 850 °C technologií fluidního spalování. [17]

1.1.8 Alkalické aktivátory

Nejčastějšími alkalickými aktivátory jsou hydroxidy draselný a sodný, vodní sklo sodné či draselné, méně časté jsou roztoky alkalických uhličitánů. [7] Draselné aktivátory jsou používány méně, a to v důsledku jejich vyšší ceny, ačkoliv, tyto aktivátory významně redukuje tvorbu výkvětů. [14] Druh a množství alkalického aktivátoru má vliv na rychlost reakce, zpracovatelnost a výsledné mechanické vlastnosti. [25]

1.1.8.1 Hydroxidy

Hydroxid sodný (draselný) je bílá krystalická látka, nejčastěji ve formě peciček. Je silně hygroskopický a také pohlcuje vzdušné CO_2 za tvorby uhličitanu. Je rozpustný v ethanolu, methanolu a vodě. Leptá sklo, porcelán, obecně je to silně korozivní sloučenina. Výroba spočívá v elektrolýze vodného roztoku NaCl . [26] Další možností je reakce uhličitánů s hydroxidem vápenatým. [7]

1.1.8.2 Alkalické uhličitany

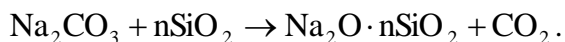
Pro přípravu geopolymerních malt se z této skupiny látek nejčastěji používají uhličitan sodný a draselný, obě sloučeniny jsou rozpustné ve vodě. [27]

1.1.8.3 Vodní sklo

Pod pojmem vodní sklo označujeme tuhé taveniny alkalických křemičitanů proměnlivého stechiometrického složení i vodné roztoky těchto tavenin. [28] Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno silikátovým modulem M , což je molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$. Běžně se tato hodnota pohybuje v rozmezí 2,0 – 3,7. Dále se ještě k charakterizaci používá hustota, viskozita či hodnota pH. [29] Vodní sklo působí nejen jako alkalický aktivátor, ale také jako pojivo.

Výroba vodního skla

Pevný křemičitan sodný se vyrábí tavením sklářského písku se sodou při teplotě 1300 až 1400 °C:



Ze vzniklé taveniny se získají chlazením vodou granule pevného křemičitanu sodného. Složení těchto produktů se pohybuje kolem 76 % SiO_2 a 23 % Na_2O . Rozpuštěné vodní sklo se získává z granulí v autoklávu, do něž se za míchání přivádí vodní pára pod tlakem. Vodní sklo je roztok alkalických silikátů ve vodě (obsahující polymerní sloučeniny silikátu s Si_2 až Si_5). Koncentrované roztoky sodných nebo draselných skel jsou viskózní, silně alkalické kapaliny. [30] Tuhnutí a tvrdnutí vodního skla spočívá v tvorbě pevného gelu kyseliny křemičité, ke kterému dochází při porušení hydrolytické rovnováhy okyselením vodního skla. Postačí však i snížení pH působením vzdušného CO_2 . [28]

1.1.9 Výkvěty

Na betonových útvarech, ať už cementových či geopolymerních, dochází k tvorbě výkvětů. Většinou jde o sodné, draselné či vápenaté sírany nebo uhličitany, zřídka i o síran hořečnatý. Tyto soli vytváří bílou, tenkou a zakalenou vrstvu na površích nejčastěji budov postavených z pórovitých materiálů. Vznikají během vysychání mokřích materiálů, kdy soli rozpuštěné v jejich pórech krystalizují a vycházejí na povrch. Významnou roli zde sehrává voda, která jednotlivé soli jak rozpouští, tak transportuje. Výkvěty jsou všeobecně brány jako estetická vada materiálu. [31]

1.2 Omítky

Omítka je nejvýraznějším prvkem domu, její vzhled ovlivňuje vizáž budovy jako celku. Kromě designu mají omítky řadu technických vlastností, které ovlivňují jejich životnost a vhodnost použití pro daný typ domu.

1.2.1 Anorganická plniva

Hlavním plnivem maltových směsí je písek, jehož granulometrie je závislá na druhu omítky. Granulometrie kameniva má význam jak technologický, tak estetický. Z technologického hlediska je významný průběh granulometrické křivky, tj. zastoupení jednotlivých frakcí písku. Pokud je v omítce obsažen písek s velikostí zrna v úzkém rozmezí a chybí-li jemné podíly, dochází k tvorbě mezerovité struktury. Na druhé straně příliš vysoká koncentrace nejjemnějších podílů způsobuje, že není dostatek pojiva, aby obalilo tato zrna, což se negativně projevuje na mechanických vlastnostech zatvrdlých omítek. Touto vlastností se vyznačují písky kopané s vysokým podílem jílových součástí. Jílové minerály v kopaném písku zaručují lepší plasticitu malty při nanášení. Zároveň také způsobují větší smrštění a zkracují životnost omítky, pokud není povrchově ošetřena. Ostrý písek s plynulou granulometrií zaručuje vyšší pevnosti omítek, menší smrštění a delší životnost. [32]

1.2.2 Anorganická pojiva

Stavební pojiva jsou nejčastěji anorganické látky, které s vodou tvoří zpracovatelnou směs. Po zatvrdnutí získávají potřebné mechanické, fyzikálně chemické a chemické vlastnosti a spolu s plnivem tvoří kompozitní materiály (malty, betony). Anorganická stavební pojiva nazýváme maltoviny. [32] Maltoviny jsou práškovité látky, které po smíchání s vodou vytvářejí pastovitou suspenzi. Ta postupně tuhne a poté zatvrdne v pevnou kompaktní hmotu. Maltoviny obecně rozdělujeme na:

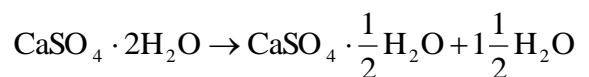
- maltoviny vzdušné – výrobky z nich zhotovené zatvrdnou a jsou stálé pouze na vzduch (vzdušná vápna, sádra, hořečnaté maltoviny)
- maltoviny hydraulické – vytvořené výrobky tuhnou a tvrdnou a dále mají tvarovou stálost a pevnost jak na vzduchu, tak i při uložení ve vodě (cementy, hydraulická vápna). [33]

1.2.3 Omítky hliněné

Jíly ve formě hlín jsou historicky nejstarším pojivem. Jíly jsou nekovové anorganické materiály, mají vrstevnatou strukturu, ve vodě jsou prakticky nerozpustné, ale botnají. Mezi nejčastější jílové minerály, které se v těchto hlínách vyskytují, patří kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), montmorillonit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), halloysit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), illit ($n\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Keramické hlíny se vyznačují dobrou zpracovatelností a vysokou plasticitou, ale také značným smršťováním při vysychání.

1.2.4 Omítky ze sádry a sádrovin

Surovinou pro výrobu sádry je přírodní sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nebo energosádrovec. Sádrové omítky se vyrábějí z rychletuhnoucí sádry s přídavkem regulátorů tuhnutí. Jako rychletuhnoucí sádra se rozumí α - či β -sádra. Obě modifikace jsou hemihydráty síranu vápenatého. [32] Ten vzniká zahříváním dihydrátu, při kterém z molekuly odchází 3/2 vody, která je slabě vázaná na kation vápníku. Zbylá polovina molekuly vody je iontově navázána na síranový anion a odpařuje se až při teplotě 350 °C. (34) Vznik hemihydrátu popisuje rovnice:



Výhodou sádrových omítek je rychlé vytváření pevné struktury zpětnou hydratací za vzniku sádrovce, které je ukončeno již po 3 dnech. Během přípravy je důležité, aby byl vodní součinitel co možná nejnižší (obvykle se pohybuje v rozmezí 0,6 – 0,8). Přebytečná voda totiž v sádře zanechává póry. Systém pórů je spojitý a umožňuje přijímání a uvolňování vlhkosti, což ovlivňuje její pevnosti.

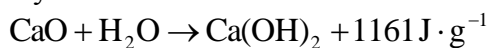
1.2.5 Omítky z hořečnaté maltoviny

Hořečnatá maltovina je dvousložková, sestávající z kaustického magnezitu (MgCO_3) a roztoku chloridu hořečnatého (MgCl_2) nebo síranu hořečnatého (MgSO_4). Kdy kaustický magnezit je v podstatě oxid hořečnatý získaný pálením magnezitu při teplotě 700 – 800 °C. Výsledné vlastnosti zatvrdlého produktu jsou závislé na poměru $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$, čím vyšší je koncentrace chloridu hořečnatého, tím směs pomaleji tuhne, ale výsledné pevnosti jsou vyšší. Výsledným produktem reakce je hydratovaný hydroxidochlorid hořečnatý ($x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, kde $x = 3 - 5$, $y = 7 - 8$). Tuhnutí a tvrdnutí je odrazem

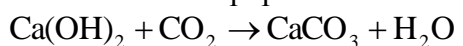
krystalizace tohoto produktu. Čerstvá směs pojme velké množství plniva, jehož druh se volí dle účelu použití.

1.2.6 Omítky vápenné ze vzdušného vápna

Vzdušné vápno sestává převážně z oxidu nebo hydroxidu vápenatého ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) a tuhne i tvrdne pouze na vzduchu. Jako surovina pro výrobu vzdušného vápna slouží čistý vápenec (CaCO_3), pro výrobu dolomitického vápna je to dolomitický vápenec ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Ten se dehydratuje při $1050 - 1250^\circ\text{C}$. Získaný produkt se nazývá pálené vápno, avšak pro použití vápna jako stavebního pojiva se musí nechat pálené vápno zreagovat s vodou. Tím vzniká vápno hašené. Hašení vápna je proces hydratační, při kterém za uvolnění tepla vzniká hydroxid vápenatý dle rovnice:



Zpevňovací proces vzdušného vápna se nazývá karbonatace, při níž vzniká nerozpustný uhličitán vápenatý. Tuto chemickou reakci lze popsat rovnicí:



Proces karbonatace je pomalý a je závislý na koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu, na relativní vlhkosti vzduchu a také na jeho teplotě. Vytváření pevné struktury v omítkách při použití vzdušného vápna má dvě fáze. V první fázi dochází k odsátí vody z malty porézním materiálem zdiva. Během druhé fáze probíhá karbonatace, tj. reakce hydroxidu vápenatého se vzdušným CO_2 .

1.2.7 Omítky z hydraulického vápna

Hydraulické vápno se vyrábí z vápenců s obsahem jílu pálením na teplotu 1100 až 1200°C . Při této teplotě spolu reagují oxid vápenatý s hydraulickými oxidy, tedy s oxidem křemičitým, hlinitým a železitým. Tyto omítky vytvářejí pevnou strukturu tak, že v první fázi se omítka zpevní odsátím přebytečného množství vody a současně reagují bezvodé křemičitany a hlinitany vápenaté s vodou za tvorby hydratovaných sloučenin. Právě tyto hydratované sloučeniny jsou příčinou vyšší pevnosti omítek, odolnosti omítek proti působení vody a také vyšší odolnosti proti působení kyselých plynů. Hydratované sloučeniny v omítkě vytvoří spojitou síť, ve které jsou uloženy molekuly hydroxidu vápenatého. Ty postupně karbonatují tak, jak k nim difunduje oxid uhličitý ze vzduchu.

1.2.8 Omítky cementové

Portlandský cement je práškové hydraulické pojivo. Vyrábí se jemným rozemletím křemičitanového slinku s hlavní přísadou sádrovcem. Po smísení s vodou vytváří po určité době pevnou, voděodolnou strukturu. Vlastnosti cementových omítek určuje především jeho mineralogické složení. Hlavními slinkovými materiály jsou trikalciumpsilikát ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dikalcium silikát ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), trikalciualuminát ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalciumaluminátferit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Portlandský cement dále obsahuje nežádoucí volný oxid vápenatý a oxid hořečnatý, dále pak sádrovec jako regulátor tuhnutí.

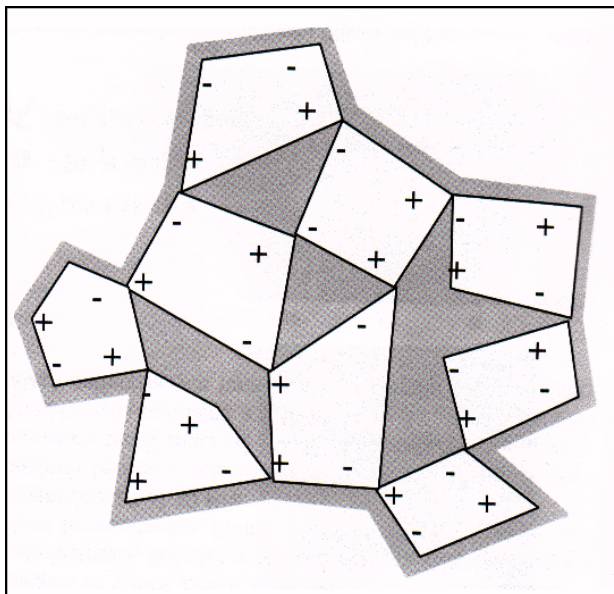
Tuhnutí a tvrdnutí cementu jsou fyzikální projevy hydratačních reakcí slinkových minerálů s vodou. Bezvodé sloučeniny se mění na hydratované produkty gelovitého či krystalického charakteru. [32]

1.3 Superplastifikátory

Cílem této bakalářské práce je příprava tenkovrstvých omítek z alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů s vhodnými modifikátory reologie. Jako tyto modifikátory byly vybrány

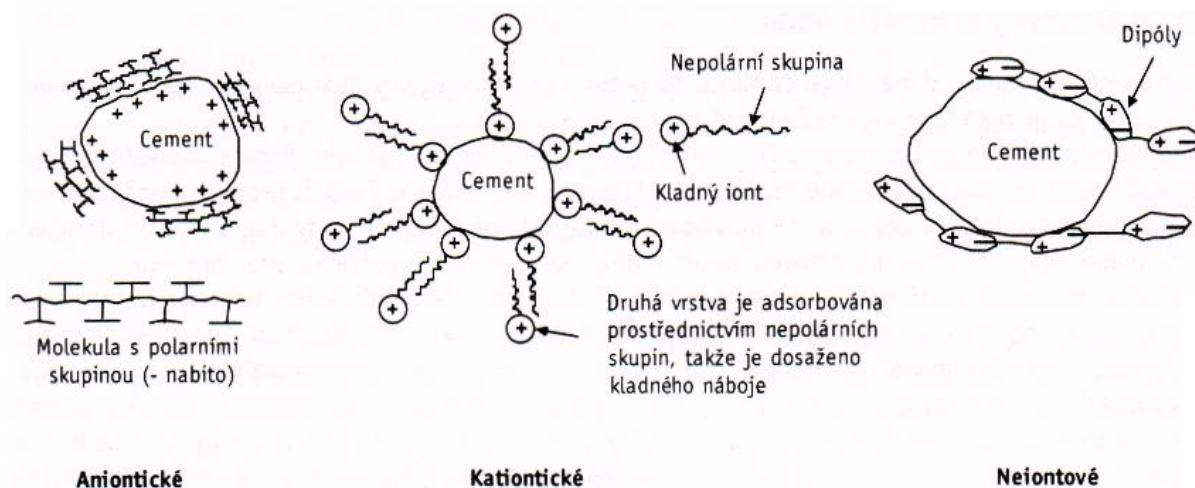
superplastifikátory (SP). Ty se hojně používají při zpracování čerstvých cementových betonů. V rámci této bakalářské práce byl však zkoumán jejich vliv na geopolymerní betony.

Již asi ve čtyřicátých letech minulého století bylo zjištěno, že určité organické molekuly, známé svým dispergačním účinkem, mohou být užity i k neutralizaci povrchových nábojů na povrchu cementových zrn. Tím snižují jejich sklon ke flokulaci, tento jev je vykreslen na *Obrázku 7*. Tyto molekuly jsou dosud užívány a prodávány jako plastifikátory, superplastifikátory a disperzní činidla. [34]



Obrázek 7: Částice cementu ve flokulovaném stavu [23]

SP jsou povrchově aktivní polymerní látky, které snižují množství záměsové vody a zároveň zlepšují zpracovatelnost cementových past. [35, 36] Základní vlastnost SP je jejich povrchová aktivita. Obecně se jedná o molekuly s relativně dlouhými (polymerními) řetězci zakončenými silně polární skupinou. Ve vodném roztoku se chovají jako tenzidy a absorbují se na povrchu částice tak, že jejich polární zakončení převládají na vnějším povrchu superplastifikátorem upraveného zrna. [28] Co se týče chemismu, SP mohou být aniontové, kationtové nebo ne-iontové povahy, což nám popisuje *Obrázek 8*. SP iontového typu jsou složeny z molekul, které mají na konci řetězce výrazný náboj. Ten neutralizuje opačné elektrické náboje na povrchu částic cementu. V případě nepolárních superplastifikátorů působí molekuly jako dipóly, obklopující cementové zrno. [34]



Obrázek 8: Různé typy dispergujících činidel [34]

1.3.1 Mechanismus dispergace cementových past

Různé druhy SP dispergují cementové částice odlišným způsobem. Jedním z nich je elektrostatické odpuzování. SP adsorbované na povrchu částice hydratujícího cementu přenesou na tento povrch negativní elektrický náboj. Polymery, které nejsou adsorbovány, nebo jsou adsorbovány jen slabě, ovlivňují reologii cementové pasty jen málo. Stejně elektrostaticky nabitě cementové částice se navzájem odpuzují, čímž dochází k deflokulaci a disperzi těchto částic v systému. Další možnost, jak dosáhnout deflokulace cementových zrn, jsou krátkodobé interakce mezi částicemi způsobené sterickým efektem, během kterých dochází k vzájemnému odpuzování těchto částic. Velikost elektrostatického sterického efektu a jeho důležitost se mění v závislosti na molekulové váze a typu daného superplastifikátoru. Díky deflokulačnímu a dispergačnímu efektu SP je zlepšen kontakt mezi povrchem cementových částic a vodou. Tento efekt napomáhá rychlejší hydrataci cementových částic a při správném dávkování SP může zvýšit stupeň hydratace cementu. U SP sulfonátového typu se nejvíce uplatňuje efekt elektrostatický. Sterický efekt je pak dominantní u akrylátových polymerů obsahujících dlouhé hydrofilní postraní řetězce. Elektrostatický efekt je u těchto polymerů v útlumu díky jejich nízké hustotě náboje. Některé SP jsou adsorbovány selektivně na konkrétní cementové fázi, například sulfonované polymery se prominentně adsorbují na fázi C_3A .

1.3.2 Vliv ζ -potenciálu na množství naadsorbovaného superplastifikátoru na cementové fázi

Pro efekt SP má zásadní význam hodnota elektrostatického potenciálu ζ částic tuhé komponenty vznikající v elektrické dvojvrstvě na rozhraní pevné a kapalně fáze a charakterizuje povrch tuhé fáze a jeho změny ve vodních suspenzích s chemickými přísadami. Při chemisorpci iontů na povrchu tuhých látek z okolního roztoku hraje významnou roli hodnota pH. Bez přítomnosti SP mají hydroxidy kovů a kalciumsilikáty slínku potenciál záporný, kdežto trikalciualuminát a tetrakalciumaluminoforit kladný, proto dochází u portlandského cementu (PC) k aglomeraci částic. Přídavek SP pak způsobí změnu hodnoty zeta-potenciálu všech fází na zápornou, díky čemuž se částice odpuzují. SP se může adsorbovat pouze při pozitivním zeta-potenciálu. Negativní ζ -potenciál tuto adsorpci znemožňuje.

1.3.3 Retardační efekt superplastifikátorů

Téměř u všech typů SP se můžeme setkat s retardačním účinkem. U sulfonovaných SP tento efekt můžeme porovnat s retardačním efektem sádrovce ve směsích na bázi PC spočívajícím v tvorbě vrstvičky ettringitu na povrchu částic C_3A a tím ke zpomalení tuhnutí a prodloužení doby zpracovatelnosti.

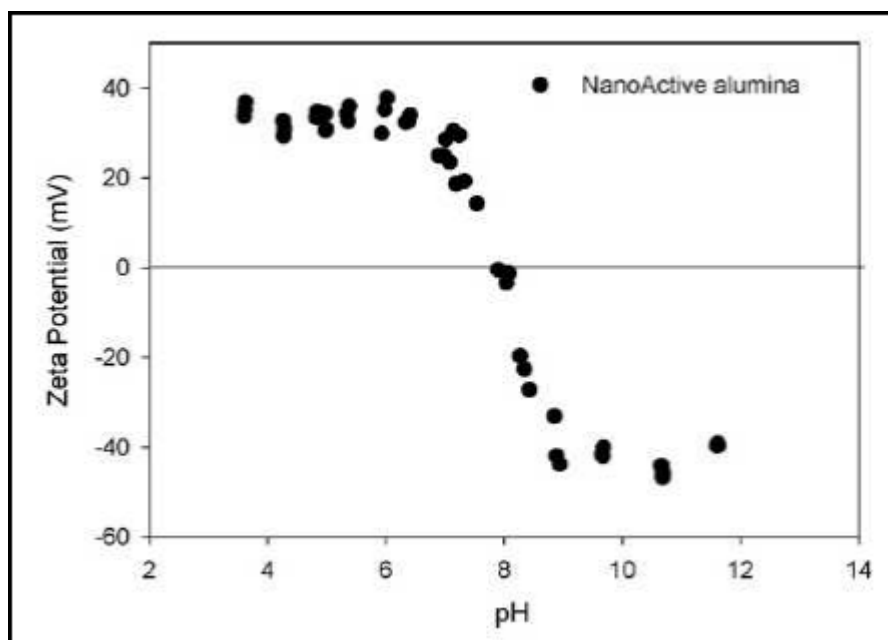
1.3.4 Závislost adsorpce superplastifikátoru na pH u materiálů nahrazujících cement

Adsorpce SP závisí především na velikosti ζ -potenciálu, proto lze předpokládat, že se adsorpce SP bude měnit podle toho, jak se bude měnit ζ -potenciál hlavních složek v závislosti na pH.

V případě strusky je hodnota ζ -potenciálu značně ovlivněna jejím složením. Největší vliv má množství $Ca(OH)_2$, které se může vytvořit při styku strusky s vodou. Se zvyšováním množství $Ca(OH)_2$ dochází ke zvyšování hodnoty ζ -potenciálu. Tím dochází ke zvýšení adsorpce SP.

Křemičité úlety a SUK jsou materiály obsahující hlavně SiO_2 , takže adsorpce SP bude záviset zejména na množství SP, které se může naadsorbovat na tento oxid při změně pH. [37] Dle [38], při zvýšení pH dochází ke zvýšení povrchového náboje na SiO_2 . Tím by mělo dojít ke zvýšení míry přitahování záporně nabitého SP a také ke zvýšení hodnoty ζ -potenciálu. [37]

Metakaolin lze chemicky považovat za směs oxidů Al_2O_3 a SiO_2 , z tohoto důvodu bude míra adsorpce SP záviset na adsorpci na oba oxidy. Na *Obrázku 9* je znázorněna změna ζ -potenciálu Al_2O_3 v závislosti na změně pH. Jelikož při změně pH ze 7 na 9 dochází k velkému poklesu ζ -potenciálu, lze očekávat velké snížení adsorpce SP na metakaolin při stejné změně pH. [37]



Obrázek 9: Změna ζ -potenciálu Al_2O_3 v závislosti na změně pH [37]

1.3.5 Typy superplastifikátorů

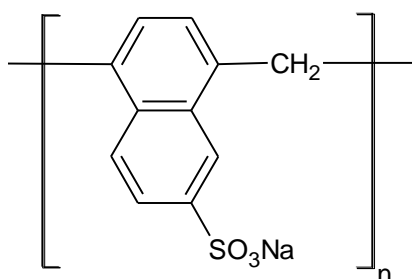
Existují čtyři základní skupiny komerčních SP:

- naftalenové SP (sulfonové soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů)

- melaminové SP (sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu)
- lignosulfonáty
- polyakryláty (polykarboxyláty). [34]

1.3.5.1 Naftalenové superplastifikátory

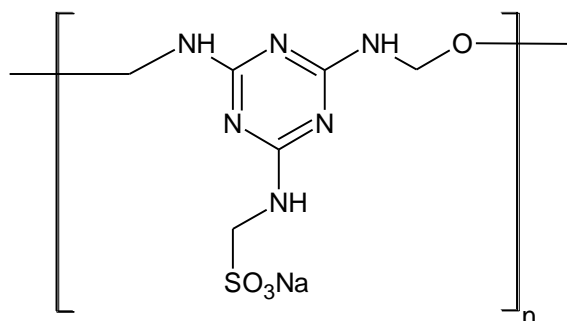
Naftalenové SP jsou dodávány jako hnědé kapaliny nebo jako prášek s obsahem sušiny 40 až 42 %. Obě tyto formy jsou v podobě sodných či vápenatých solí. Při použití tohoto SP se snáze udržuje reologie betonu, neboť naftalenové SP poněkud zpožďují tuhnutí.



Obrázek 10: Molekulární struktura poly- β -naftalensulfonátu sodného [39]

1.3.5.2 Melaminové superplastifikátory

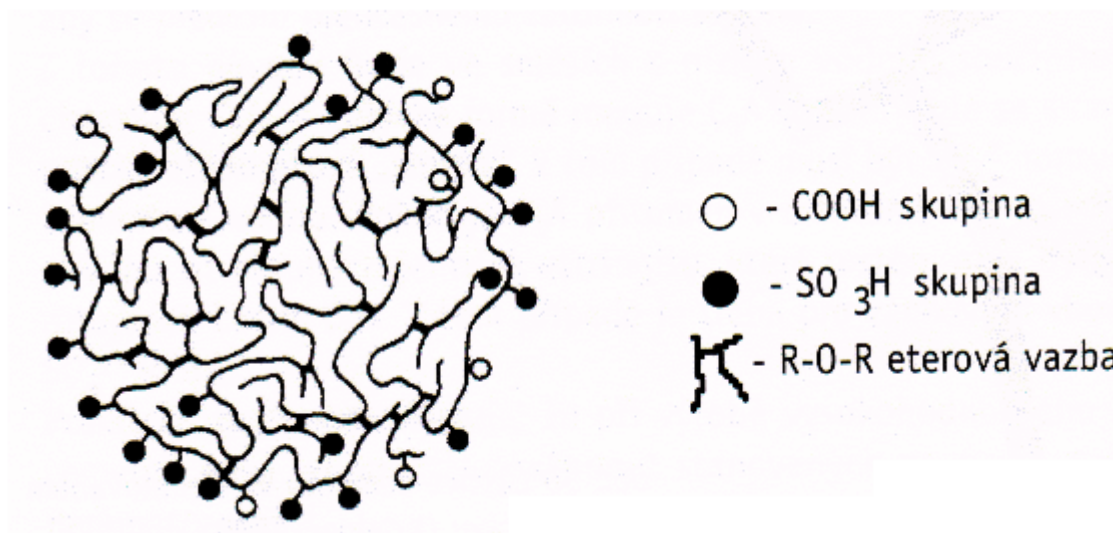
Tyto SP jsou čiré kapaliny obsahující obecně 22 % sušiny, některé modernější mohou obsahovat až 40 %. Většinou se jedná o sodné soli sulfonovaných melaminů. Melaminové SP nezpožďují tuhnutí betonu tolik, jako naftalenové, zachycují méně vzduchu, snadněji udržují stabilní a vhodné provzdušnění betonu, na povrchu předpjatých dílců vytvářejí melaminové SP méně vzduchových bublin, tento typ superplastifikátorů také neovlivňuje výslednou barvu betonu.



Obrázek 11: Molekulární struktura polymelaminsulfonátu sodného [39]

1.3.5.3 Lignosulfonátové superplastifikátory

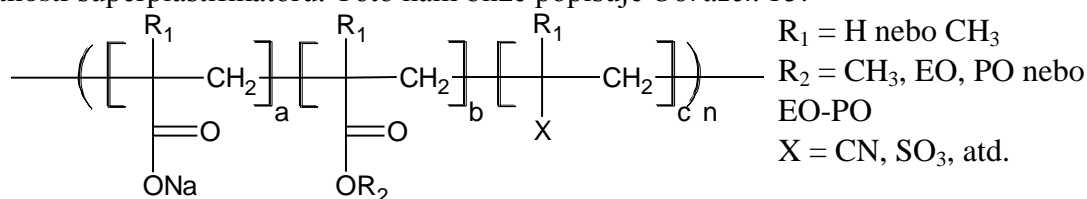
Tyto molekuly jsou získávány z papírenských odpadů. Jejich výhodou je nízká cena, avšak jejich účinnost nedosahuje hodnot ostatních SP. Navíc při zvýšené dávce těchto disperzních činidel hrozí retardace betonu. Ta může být způsobena vytvářením velkých vzduchových bublin, jejichž vznik způsobují povrchově aktivní činidla obsažená ve dřevě. Další nebezpečí spočívá v obsahu sacharidů, které způsobují zpomalení tvrdnutí cementové pasty. Častěji se proto lignosulfonáty používají ve směsi s naftalenovými či melaminovými SP.



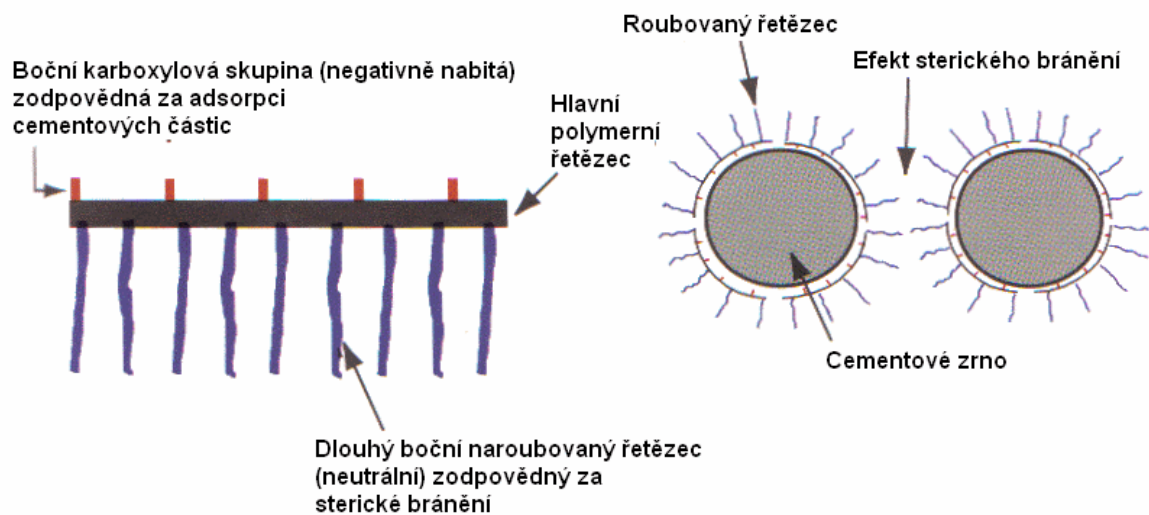
Obrázek 12: Schematické znázornění lignosulfonátu [34]

1.3.5.4 Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů

Svět SP na bázi polykarboxylátů je velice pestrý. Jediným společným rysem těchto polymerů je přítomnost skupiny COOH. Tyto polymery dispergují cementová zrna zejména sterickým odpuzováním. Polykarboxyláty jsou účinnější než polysulfonáty. Jejich optimální dávka je tedy asi poloviční až třetinová ve srovnání s dobrým polysulfonátem. Struktura molekuly je tvořena základními řetězci polyakrylátů nebo polymetakrylátů, na které se vážou boční řetězce z polyethylenoxidů (PEO) nebo polypropylenoxidů (PPO) či jejich směsi. Schematické znázornění molekul těchto SP připomíná hřeben. Stavba těchto hřebenů a jejich tvar ovlivňuje jak adsorpci molekul na pevné částice, tak na disperzní schopnosti a na celkové vlastnosti superplastifikátorů. Toto nám blíže popisuje *Obrázek 13*.



Obrázek 13: Schéma superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů [34]



Obrázek 14: Schematické znázornění polykarboxylátového superplastifikátoru a jeho efekt sterického bránění na disperzi cementových zrn [40]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Použité suroviny

Metakaolin

Mefisto L05, České lupkové závody, a.s.

Písek

ČSN jemný, střední, hrubý, Provodínské písky, a.s.

Vodní sklo

Sodno-hlinité (Desil Al), Vodní sklo, a.s.

Superplastifikátory

CHRYSO Fluid CE 40 W, CHRYSO Chemie, s.r.o.

CHRYSO Fluid GT, CHRYSO Chemie, s.r.o.

CHRYSO Fluid Optima 100, CHRYSO Chemie, s.r.o.

CHRYSO Fluid Optima 185, CHRYSO Chemie, s.r.o.

CHRYSO Plast 460, CHRYSO Chemie, s.r.o.

CHRYSO Plast 760, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Dynamon SX-14, MAPEI, spol. s.r.o.

Destilovaná voda

2.2 Infračervená spektrometrie

Principem infračervené spektrometrie je absorpce infračerveného záření molekulami látek. Toto záření má vlnočet v intervalu $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$. Energie infračerveného záření nestačí na změny elektronových stavů, způsobuje pouze změny vibračních a rotačních stavů molekul. [41] Touto metodou byly měřeny infračervená spektra jednotlivých SP, a také spektrum vybraného SP, který byl vyluhován z geopolymerní pasty.

2.2.1 Příprava vzorků

Všechna infračervená spektra byla stanovena KBr technikou. Dobře vysušený KBr byl rozetřen v achátové třecí misce a byly z něj pomocí lisu zhotoveny tablety. Na vylisované tablety byl nanášen v malém množství SP, z tablet bylo poté na Petriho miskách pomocí sklokeramického vaříče odpařeno rozpouštědlo.

Výluh vybraného typu SP byl připravován ze zatvrdlé omítkové pasty, která byla použita pro měření na isoperibolickém kalorimetru. Vzorek byl rozemlet ve vibračním mlýnu na jemný prášek. 80 g tohoto prášku bylo v Erlenmayerově baňce zalito 180 g acetonu a suspenze byla na 20 minut umístěna na třepačku. Poté byla pevná fáze odfiltrována a acetonový roztok byl zahuštěn. Zahuštěný roztok byl v malém množství nanášen na KBr tabletu obdobným způsobem jako v případě samotných SP. Takto připravená tableta byla proměřena na infračerveném spektrometru.

2.3 Rentgenová fluorescenční spektrometrie

Jednoduchou metodou pro stanovení prvkového složení je rentgenová fluorescenční spektrometrie. Principem metody je interakce rentgenového záření se vzorkem. Při této interakci dochází k vyražení elektronu z vnitřních slupek zkoumané látky. Následně dojde k přesunu elektronu z vyšších energetických hladin a k vyzáření sekundárního rentgenového záření. Toto záření je charakteristické pro všechny prvky. Tato metoda byla zvolena pro upřesnění složení vodního skla použitého při syntéze. [42]

2.3.1 Příprava vzorku

Na přípravu vzorku byla na Petriho misce odpařena voda o hmotnosti 15,5 g z celkové hmotnosti vodního skla 33,5 g. Z odebraného množství 16,7 g sušiny byla poté vylišována tableta, která byla podrobena prvkové analýze na rentgenovém fluorescenčním spektrometru EX6600 Xenometrix.

2.4 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

2.4.1 Příprava vzorků geopolymerních betonů

Postup pro přípravu jednotlivých geopolymerních omítek byl totožný, měnil se pouze typ SP přísady, její množství a množství přidané záměsové vody. Pro udržení stejné konzistence se množství záměsové vody odvíjelo od aktuální potřeby během míchání směsi. Nejprve bylo v laboratorní míchačce zhomogenizováno po dobu jedné minuty 150 g metakaolinu L 05, 150 g písku ČSN hrubý, 150 g písku ČSN střední a 150 g písku ČSN jemný. K této homogenní směsi bylo přidáno 124 g sodno-hlinitého vodního skla, různé množství daných SP přísad a záměsová voda dle potřeby. Směs byla míchána po dobu tří minut. Poté byla namíchaná geopolymerní omítka nalita do zkušebních trámečků o rozměrech 20x20x100 mm. Tyto trámečky byly dále zhutněny na vibračním stole a ponechány k zatvrdnutí po dobu 24 hodin volně na vzduchu při laboratorních podmínkách. Složení jednotlivých směsí je uvedeno v *Tabulce 1*.

Tabulka 1

Směs č.:	Superplastifikační přísada (údaj dle technického listu)	Množství SP [g]	Množství SP [% _{hm s}]	Množství záměsové vody [g]
I.	-	-	-	30
II. A	Dynamon SX-14 (SP na bázi polyakrylátů)	18	3	30
II. B		36	6	30
II. C		54	9	30
III. A	Fluid GT (polymer ze skupiny polymelaminů)	9	1,5	20
III. B		18	3	10
III. C		27	4,5	10
IV. A	Fluid CE 40 W (bezchloridový SP na bázi polynaftalenu)	2	0,33	20
IV. B		4,5	0,75	25
IV. C		9	1,5	20
IV. D		18	3	25
V. A	Optima 100 (polymer na bázi modifikovaných polyfosfonátů)	18	3	20
V. B		27	4,5	20
V. C		36	6	20
VI. A	Optima 185 (SP vytvořený na bázi polymerů polykarboxylátu a polyfosfonátu)	18	3	25
VI. B		27	4,5	25
VI. C		36	6	20
VII. A	Plast 760 (SP na bázi modifikovaných naftalenových polymerů)	9	1,5	20
VII. B		18	3	20
VII. C		27	4,5	10
VIII. A	Plast 460 (SP na lignosulfonanové bázi)	9	1,5	25
VIII. B		18	3	20
VIII. C		27	4,5	20

Poznámka: %_{hm s} = hmotnostní procenta z pevné fáze, tedy z metakaolinu a z písků

2.4.2 Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku byly stanoveny na zkušebním pracovišti DESTTEST 3310. To se skládá z lisu pro zkoušky pevnosti cementových a betonových těles v tlaku BS-3000, BS-300 a lamačky BS-10, BS-100 sloužící pro stanovení pevnosti cementových těles v tahu za ohybu. Trámečky byly testovány na lisu BS-300 a lamačky BS-10 podle normy DIN 20-20. Hodnoty naměřených pevností jsou udávány v MPa. Pevnostní zkoušky byly prováděny po 1, 7 a 28 dnech. Naměřená data jsou uvedena v *Tabulce 3* a na *Obrázcích 23 – 38*

2.5 Nanášení geopolymerních omítek na podklad

Nanášeny byly všechny již dříve uváděné směsi omítek, tedy směsi I. až VIII. C. Omítky byly nanášeny na porobetonové tvarovky (Ytong). Během nanášení byla sledována hlavně zpracovatelnost geopolymerní omítky a její přilnavost k povrchu. Tyto dvě vlastnosti se měnily s různými druhy superplastifikačních přísad a také s jejich měnící se koncentrací. Výsledky tohoto pozorování jsou uvedeny v *Tabulce 4*. Vzhled omítek s přidávanými superplastifikátory v neoptimálnějším množství jsou zaznamenány na *Obrázcích 39 – 54*.

2.6 Isoperibolická kalorimetrie

Jednou z možností, jak měřit tepelné procesy probíhající v anorganických pojivech vznikajících díky reakcím, které způsobují tuhnutí a tvrdnutí těchto pojiv, je využít isoperibolické kalorimetrie. Metoda umožňuje měřit teplotu několika vzorků záraz, a to pomocí termočlánků napojených na počítač. Termočlánky zaznamenávají v daných intervalech teplotu, tato závislost je poté vykreslena do grafu. Isoperibolický kalorimetr neměří nejen reaktivitu cementů, ale může být použit i k měření rychlostí reakcí v cementových pastách odlišného složení, které bývá obměněno necementovými částicemi mající vliv na hydrataci cementových částic.

Isoperibolická (adiabatická) kalorimetrie simuluje chování tvrdnoucího betonu uvnitř masivního bloku. Tohoto je dosaženo díky termoizolačnímu obalu, ve kterém je vzorek uložen. Ten zabraňuje přestupu tepla ze vzorku do okolí. [43]

2.6.1 Příprava geopolymerních past

Geopolymerní pasty byly připravovány obdobným způsobem jako směsi pro stanovení pevnostních zkoušek, avšak bez přidání plniva. Pro každý typ SP byla namíchána jedna pasta, všechny SP pak byly přidávány ve stejném hmotnostním zastoupení, a to 2,5 %_{hm} z PF+VS, což znamená hmotnostní procenta z celkové pevné fáze + vodního skla. Tento poměr se totiž vyskytoval u všech směsí. Hmotnostní poměry byly přepočítány na celkovou hmotnost 350 g pasty bez plniva, tedy 187 g metakaolinu, 154,5 g vodního skla a 8,5 g SP. Tyto hmotnostní poměry byly počítány bez vody, která byla do směsi přidávána dle potřeby, u všech směsí to nakonec bylo 10 g. U přípravy srovnávací pasty bez SP byly zachovány stejné hmotnosti metakaolinu i vodního skla, jen vody bylo přidáno 15 g. Z namíchaných past bylo vždy do polystyrenového kelímku o objemu 200 ml odebráno přesně 300 g. Takto připravený vzorek byl umístěn do termoizolačního obalu, který byl uzavřen polystyrenovým víčkem. Do pasty byl zasunut termočlánek připojený k počítači, který zaznamenával teplotu v nastavených časových intervalech.

2.7 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) je zařízení sloužící k pozorování struktury a povrchů pevných vzorků. Principem pozorování v skenovacím elektronovém mikroskopu je interakce primárních elektronů s povrchem vzorku za uvolnění sekundárních elektronů, které jsou snímány detektory. Detekovány jsou sekundární elektrony, což jsou primárním svazkem excitované elektrony z vnějších slupek atomů a odražené elektrony, které jsou ovlivněny atomovým jádrem. Detekce sekundárních elektronů nám přináší informaci o reliéfu vzorku a detekce zpětně odražených elektronů přináší více informací o vzorku.

Pro prvkovou a mineralogickou analýzu se používají detektory nainstalované přímo na SEM, jsou to energo disperzní spektrometr (EDS), který funguje na principu měření energie rentgenového záření vyvolaného dopadem primárního elektronu na valenční elektron prvku, kde je tento elektron vyražen a poté nahrazen elektronem z nižší slupky. Vlnově disperzní spektrometr (WDS) funguje na principu určení charakteristické vlnové délky rentgenového záření (vzniklého stejně jako u EDS) na různých krystalech při dodržení Braggova zákona. EDS slouží pro rychlou a přesnou analýzu. EBSD nám umožňuje pozorování orientace krystalů a jejich identifikaci na povrchu vzorku. [42]

2.7.1 Příprava vzorku

Vzorek byl zhotoven z již dříve namíchaného geopolymerního betonu, a to z trámečku pro stanovení pevností. Byl vybrán vzorek geopolymerního betonu s přídatkem 3 %_{hm} SP, neboť směsi s přídatkem tohoto typu SP se jeví jako nejvhodnější. Tato koncentrace byla vybrána z důvodu jejího výskytu u všech typů SP pro možnost pozdějšího porovnání. Vzorek byl ořezán na co nejmenší možnou velikost, byl iontově vyleštěn a pozlacen pro zvýšení vodivosti. Takto připravený vzorek byl podroben zkoumání na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM-7600F.

2.8 Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích

Rentgenová difrakční analýza (XRD) je základní metodou k určování struktury pevných látek. Tato metoda je založena na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v bezfotonovém stavu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu. [42]

2.8.1 Příprava vzorku

Na přípravu vzorku byla použita zatvrdlá geopolymerní pasta, která byla předtím použita pro stanovení kinetiky tuhnutí a tvrdnutí pomocí isoperibolického kalorimetru. Konkrétně se jednalo o směs s přídatkem 2,5 %_{hm} z PF+VS SP Optima 100, neboť směsi s přídatkem této sloučeniny se jeví jako nejvhodnější. Konkrétně bylo namleto 10 g této geopolymerní směsi, u které bylo následně na přístroji Analytical Empyrean změřeno XRD spektrum.

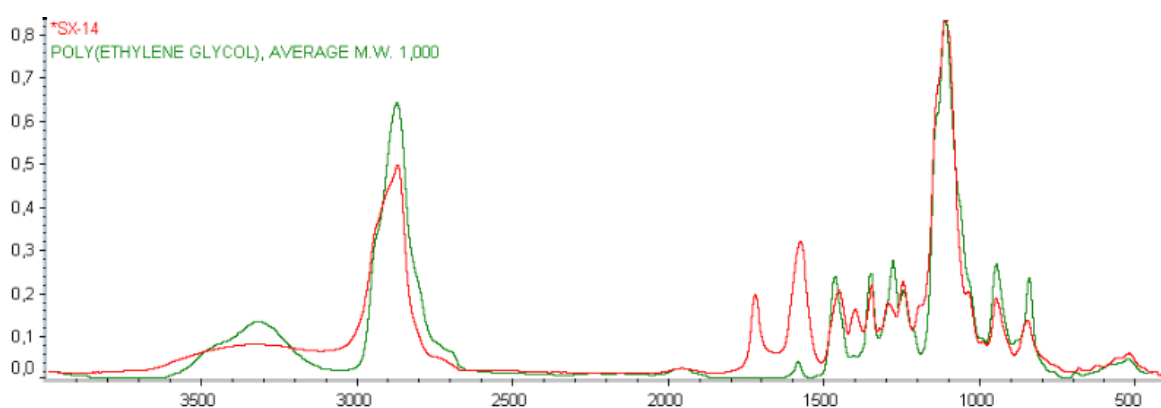
3 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této části jsou popsány výsledky hledání vhodného superplastifikátoru zlepšujícího zpracovatelské vlastnosti geopolymerních omítek a zároveň zachovávajícího výborné mechanické vlastnosti těchto poživ.

3.1 Charakterizace superplastifikátorů infračervenou spektrometrií

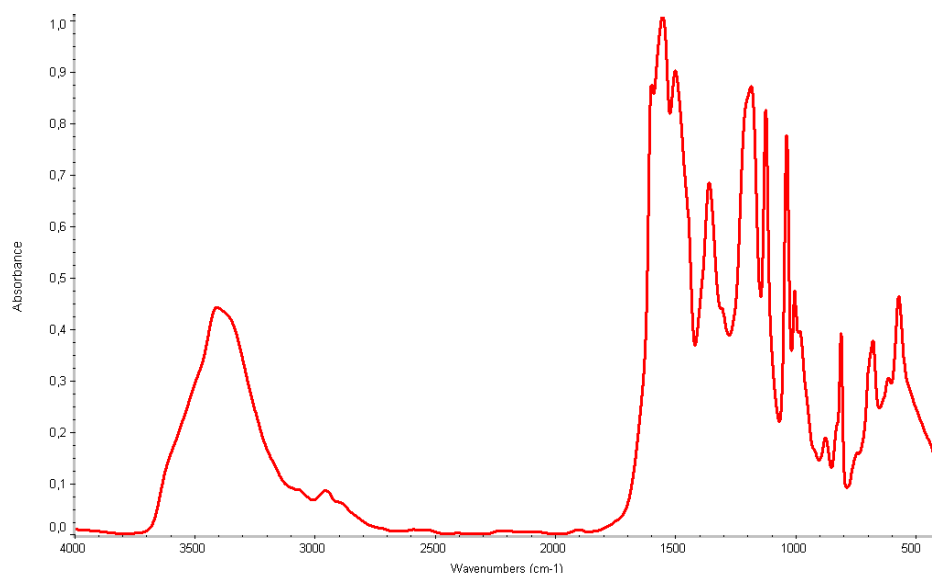
V této části byla zkoumána chemická podstata jednotlivých superplastifikátorů pomocí infračervené spektrometrie. Jednotlivá získaná spektra byla porovnávána se spektry v databázích a dle těchto databází byly určovány jednotlivé funkční skupiny a látky, které jsou v superplastifikátorech obsaženy.

Spektrum patřící Dynamonu SX-14 je uvedeno na *Obrázku 15*. Toto spektrum se téměř shoduje se spektrem polyethylenoxidu, které je na obrázku taktéž uvedeno. Hlavní rozdíly jsou v absorpčním pásu na vlnočtu 1400 cm^{-1} a 1720 cm^{-1} . Obou těmito vlnočtům mohou odpovídat stretching vibrace --COO^- skupin. Asymetrické --CO_2 -stretching vibrace se pohybují v rozmezí $4550 - 1650\text{ cm}^{-1}$, symetrické $1335 - 1440\text{ cm}^{-1}$.



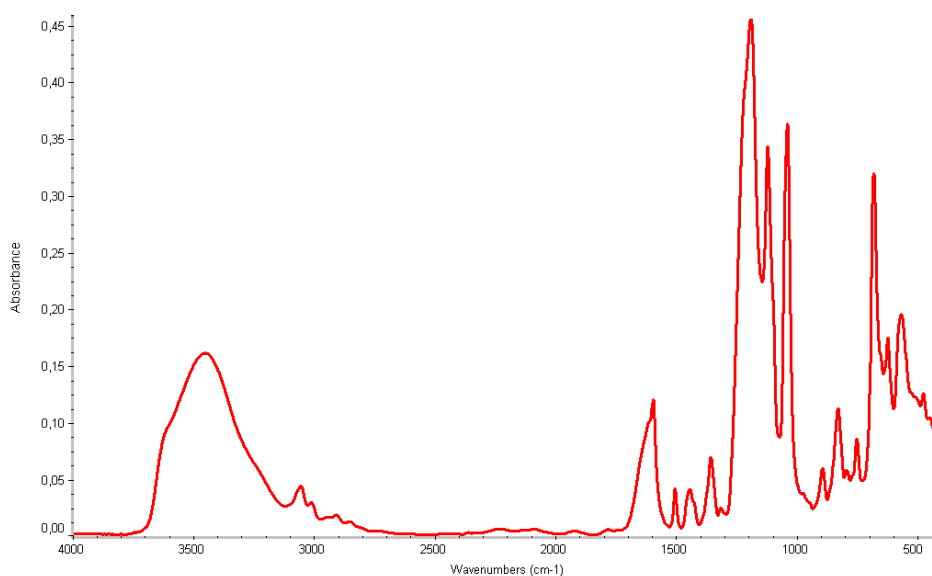
Obrázek 15: Infračervené spektrum Dynamonu SX-14 a polyethylenoxidu

Další superplastifikátor byl Fluid GT, který je v technickém listu uveden jako polymer ze skupiny polymelaminů. Jeho Spektrum je zobrazeno na *Obrázku 16*. Spektrum se neshodovalo s žádným spektrem uvedeným v databázi, jednotlivé píky tedy byly dohledávány samostatně. Jako hlavní složka byl stanoven melamin, jehož nejintenzivnější pík leží mezi $1500 - 1600\text{ cm}^{-1}$. Dále zde byly identifikovány sulfo-skupiny $\text{R-SO}_2\text{-OH}$ ($1330 - 1420\text{ cm}^{-1}$, $1145 - 1200\text{ cm}^{-1}$ a $515 - 555\text{ cm}^{-1}$), $\text{Ar-SO}_2\text{-OR}$ ($1335 - 1365\text{ cm}^{-1}$ a $1185 - 1200\text{ cm}^{-1}$), $\text{R-SO}_3^- \text{M}^+$ ($1140 - 1250\text{ cm}^{-1}$, $1030 - 1070\text{ cm}^{-1}$) ($1140 - 1250\text{ cm}^{-1}$ a $1030 - 1070\text{ cm}^{-1}$), $\text{R-SO}_3^- \text{H}_3\text{O}^+$ ($2600 - 2600\text{ cm}^{-1}$, $2250 - 2250\text{ cm}^{-1}$, $1680 - 1680\text{ cm}^{-1}$, $1120 - 1230\text{ cm}^{-1}$, $1025 - 1120\text{ cm}^{-1}$).



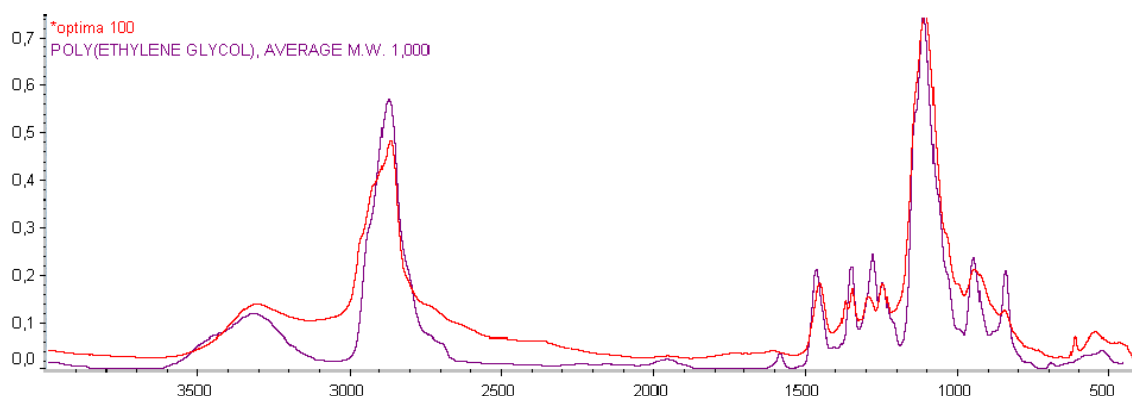
Obrázek 16: Infračervené spektrum Fluid GT

Superplastifikátor CE 40 W patří do skupiny polynaftalenových superplastifikátorů. Jeho spektrum je zobrazeno na *Obrázku 17*. Rozborem spektra byly zjištěny struktury naftalenu ($1580 - 1620\text{ cm}^{-1}$, $1505 - 1550\text{ cm}^{-1}$, $1390 - 1400\text{ cm}^{-1}$, $620 - 645\text{ cm}^{-1}$, $465 - 485\text{ cm}^{-1}$) a sulfonátů, konkrétně pak $\text{R-SO}_2\text{-OR}$, $\text{Ar-SO}_2\text{-OR}$ a $\text{R-SO}_3^-\text{M}^+$.



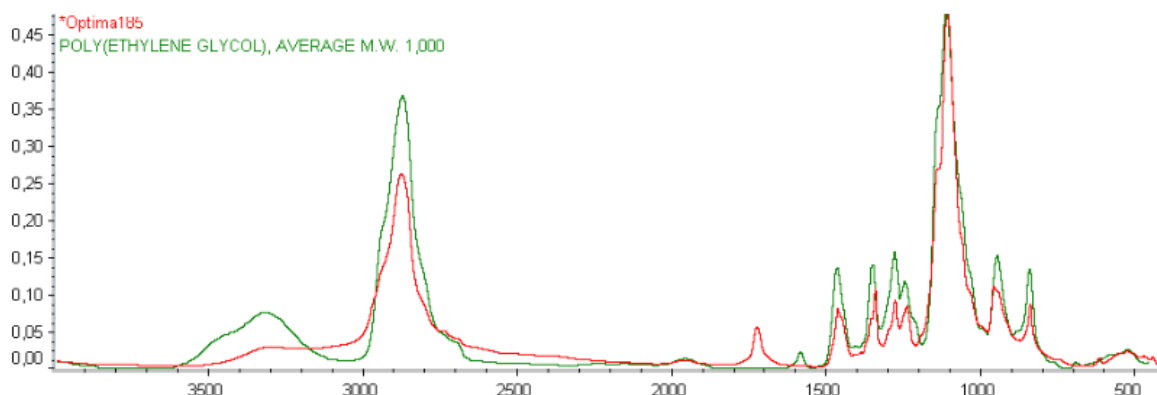
Obrázek 17: Infračervené spektrum Fluid CE 40 W

Další superplastifikátor Optima 100 má spektrum vykresleno na *Obrázku 18*. Komerčně je prodáván jako polymer na bázi modifikovaných polyfosfonátů. Jeho spektrum se dle databáze téměř shoduje s polyethylenoxidem. Lišící se píky patří právě fosfátovým skupinám R-O-P . Porovnání je uvedeno na *Obrázku 18*.



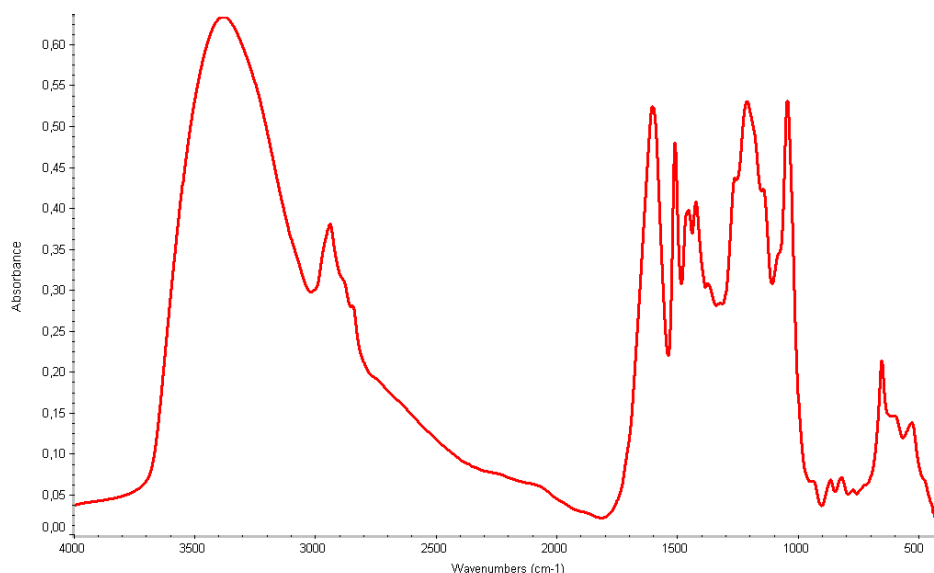
Obrázek 18: Infračervené spektrum Optima 100 a polyethylenoxidu

Optima 185 je další superplastifikátor vytvořený na bázi polymerů polykarboxylátu a polyfosfonátu, jak udává technický list výrobku. Spektrum (*Obrázek 29*) nám při porovnání s databází udává, že tento SP je na bázi polyethylenoxidu. Pík při 1720 cm^{-1} může patřit fosfátovým skupinám $\text{R}_1\text{R}_2\text{PO}(\text{OH})$ ($2525 - 2725\text{ cm}^{-1}$, $2080 - 2350\text{ cm}^{-1}$, $1600 - 1740\text{ cm}^{-1}$, $1080 - 1335\text{ cm}^{-1}$, $910 - 1040\text{ cm}^{-1}$, $450 - 540\text{ cm}^{-1}$).



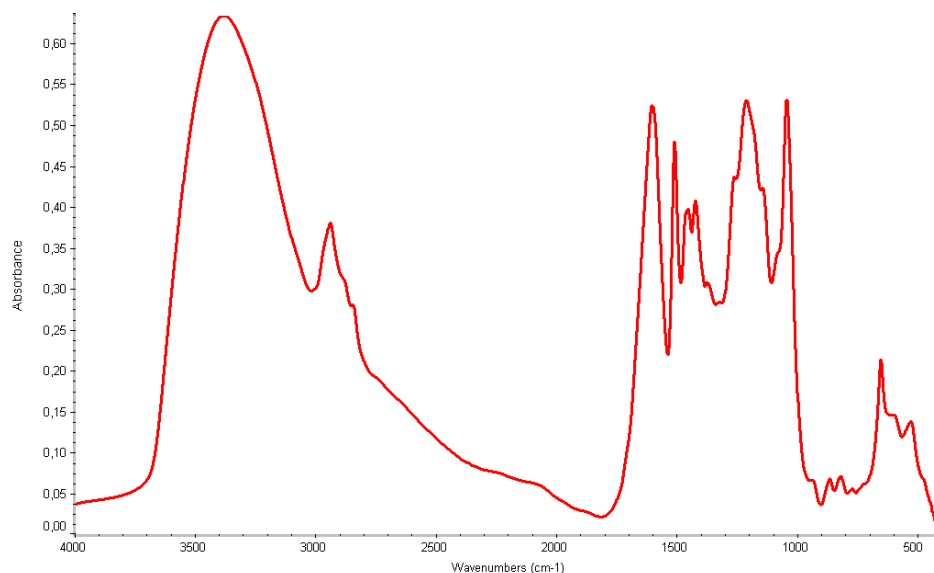
Obrázek 19: Infračervené spektrum Optima 185 a polyethylenoxidu

Plast 760 je dle technického listu plastifikátor na bázi modifikovaných naftalenových polymerů. Při bližším zkoumání jeho spektra byly objeveny pásy patřící naftalenům a sulfonátovým skupinám ($\text{R-SO}_2\text{-OR}$, $\text{Ar-SO}_2\text{-OR}$). Spektrum udává *Obrázek 20*.



Obrázek 20: Infračervené spektrum Plast 760

Plast 460 komerčně vystupuje jako superplastifikátor na lignosulfonanové bázi. V jeho spektru (*Obrázek 21*) bylo možno pozorovat skupiny sulfátové ($(\text{RO})_2\text{SO}$, $\text{R-SO}_3^-\text{Na}^+$) či COOH skupiny.



Obrázek 21: Infračervené spektrum Plast 460

3.2 Charakterizace vodního skla rentgenovou fluorescenční spektrometrií

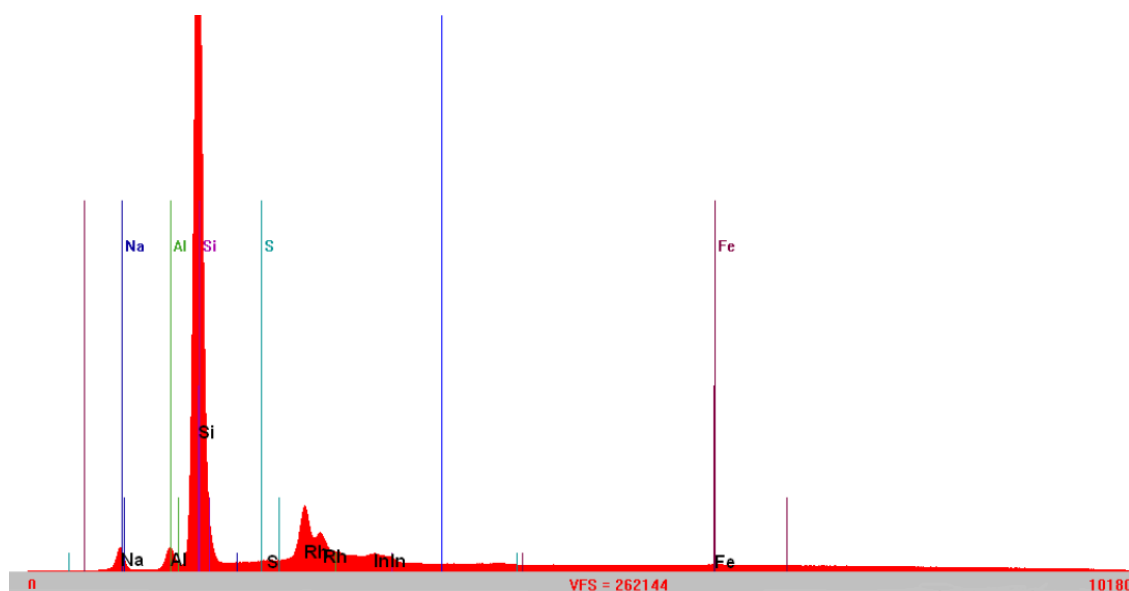
Nejprve bylo stanoveno množství vody obsažené ve vodním skle změnou hmotnosti, která nastala po odpaření veškeré vody ze vzorku. Díky tomuto údaji bylo možno dopočítat vodního součinitele jednotlivých záměsí. Sušina zbylá po odpaření pak byla podrobena rentgenové fluorescenční spektrometrii. Výstupem z ní byly vzájemné procentuální poměry základních atomů vzorku. Z těchto dat bylo možné vypočítat silikátový modul vodního skla.

3.2.1 Výpočet vodního součinitele

Výpočet byl proveden dle vzorce $w = \frac{v}{c}$, kde w je vodní součinitel, v je celková hmotnost vody a c je celková hmotnost pevné složky. Odpařením vody (13,9 g) bylo zjištěno, že vodní sklo obsahuje 46,3 % vody. Množství vody ve 124 g vodního skla, což byl standardní přírůstek, tedy odpovídalo 57,4 g.

Tabulka 2: Vodní součinitel pro různé přírůstky vody do jednotlivých geopolymerních betonů

Přírůstek vody [g]	10	20	25	30
Přírůstek vody + voda obsažená ve vodním skle [g]	67,4	77,4	82,4	87,4
Vodní součinitel [%]	0,11	0,13	0,14	0,15



Obrázek 22: Spektrum z rentgenové fluorescenční analýzy vodního skla

3.2.2 Výpočet silikátového modulu

Samotná rentgenová fluorescenční spektrometrie nám stanovila procentuální zastoupení prvků Si: Al: Na = 85,62: 3,37: 11,01. Z tohoto procentuálního zastoupení bylo určeno molární množství SiO_2 , Na_2O a $\text{Al}(\text{OH})_3$ na 100 g sušiny, a následně byl sestaven silikátový modul M vodního skla. Výstup z rentgenové fluorescenční spektrometrie je uveden na Obrázku 22.

- Vyjádření procent na gramy:

$$m_{\text{Si}} = 85,62 \text{ g}, m_{\text{Na}} = 11,01 \text{ g}, m_{\text{Al}} = 3,37 \text{ g}$$

- Výpočet látkového množství:

$$n_{\text{Si}} = \frac{m_{\text{Si}}}{M_{\text{Si}}} = \frac{85,62}{28,09} = 3,05 \text{ mol}$$

$$n_{\text{SiO}_2} = 3,05 \text{ mol}$$

$$n_{\text{Na}} = \frac{m_{\text{Na}}}{M_{\text{Na}}} = \frac{1,01}{22,99} = 0,48 \text{ mol}$$

$$n_{\text{Na}_2\text{O}} = 2 \cdot 0,48 = 0,96 \text{ mol}$$

$$n_{\text{Al}} = \frac{m_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}}} = \frac{3,37}{26,98} = 0,12 \text{ mol}$$

$$n_{\text{Al}(\text{OH})_3} = 0,12 \text{ mol}$$

- Výpočet silikátového modulu:

$$M = \frac{n(\text{SiO}_2)}{n(\text{Na}_2\text{O})} = \frac{3,05}{0,96} = 3,18$$

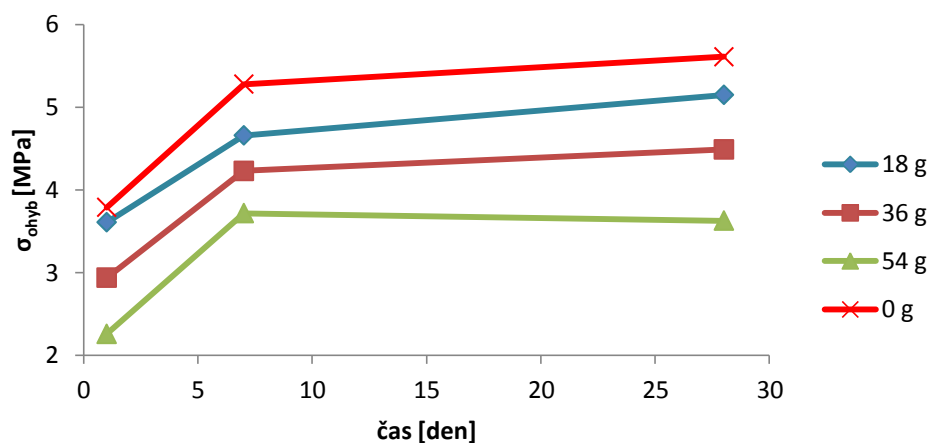
Tento vyšší silikátový modul vypovídá o vyšší aktivitě vodního skla.

3.3 Pevnosti omítek

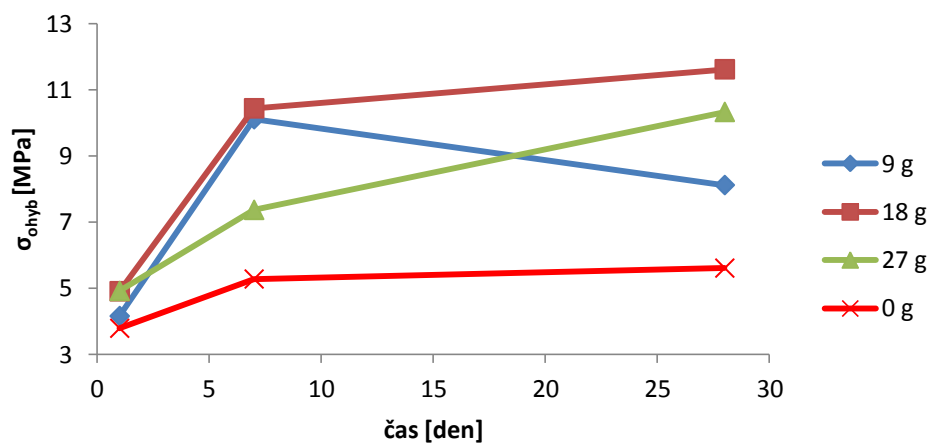
Všechny namíchané směsi omítek s přídavkem různým druhů SP o různém množství dosahovaly poměrně vysokých pevností v tlaku, avšak v tahu za ohybu byly pevnosti u všech omítek nízké. Nejvyšších pevností v tlaku dosahovaly směsi s přídavkem 2 g Fluid CE 40 W (polynaftalen). Výborné pevnosti v tlaku vykazovaly také směsi s přídavkem superplastifikační přísady Fluid GT (polymelamin). Pevnosti jak v tahu za ohybu, tak v tlaku jsou popsány v *Tabulka* . Závislosti vývoje pevností za čas jsou také uvedeny graficky na *Obrázcích 23 – 38*.

Tabulka 3: Pevnosti jednotlivých směsí v tahu za ohybu a tlaku

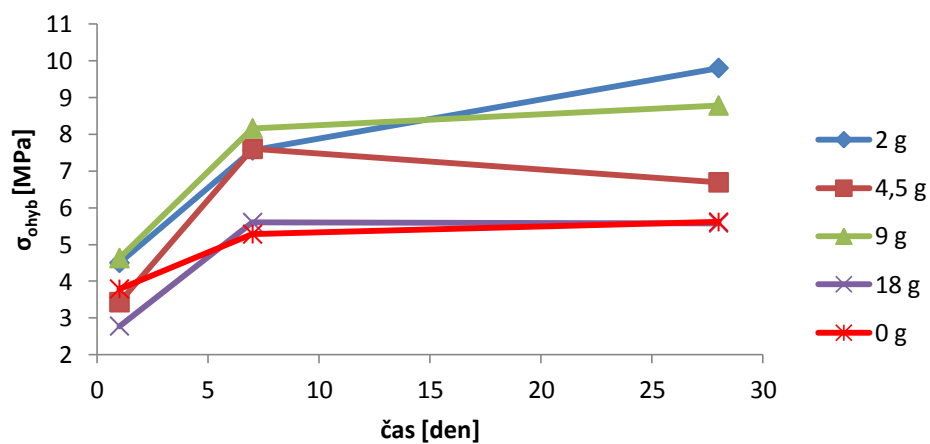
Označení směsi	σ_{ohyb} [MPa]			σ_{tlak} [MPa]		
	1. den	7. den	28. den	1. den	7. den	28. den
I.	3,79	5,28	5,69	29,57	67,20	75,35
II. A	3,61	4,66	5,15	19,56	51,35	53,45
II. B	2,94	4,23	4,49	10,99	31,14	35,08
II. C	2,26	3,72	3,63	8,11	25,30	25,97
III. A	4,16	10,11	8,12	19,96	75,52	79,99
III. B	4,91	10,44	11,62	24,33	76,99	78,28
III. C	4,92	7,37	10,33	30,16	73,66	81,93
IV. A	4,50	7,56	9,80	36,13	81,13	88,96
IV. B	3,43	7,60	6,69	31,38	70,56	79,91
IV. C	4,63	8,16	8,78	34,16	62,15	77,11
IV. D	2,78	5,60	5,58	20,94	43,76	39,88
V. A	4,16	8,24	9,92	25,55	65,87	79,81
V. B	3,48	7,76	8,30	19,91	55,61	60,35
V. C	3,03	7,94	8,83	16,73	52,99	55,47
VI. A	3,86	6,25	7,83	18,67	58,56	65,24
VI. B	3,36	5,52	7,01	13,27	47,62	54,92
VI. C	3,10	6,06	5,77	15,25	46,57	48,29
VII. A	3,37	7,00	6,54	26,56	66,67	71,62
VII. B	3,15	8,01	7,41	20,94	56,12	59,14
VII. C	3,56	7,86	7,84	22,36	55,14	62,71
VIII. A	4,85	9,53	9,59	29,88	58,92	71,50
VIII. B	3,71	6,79	7,61	22,49	42,14	53,83
VIII. C	3,60	7,57	9,32	21,53	42,47	57,03



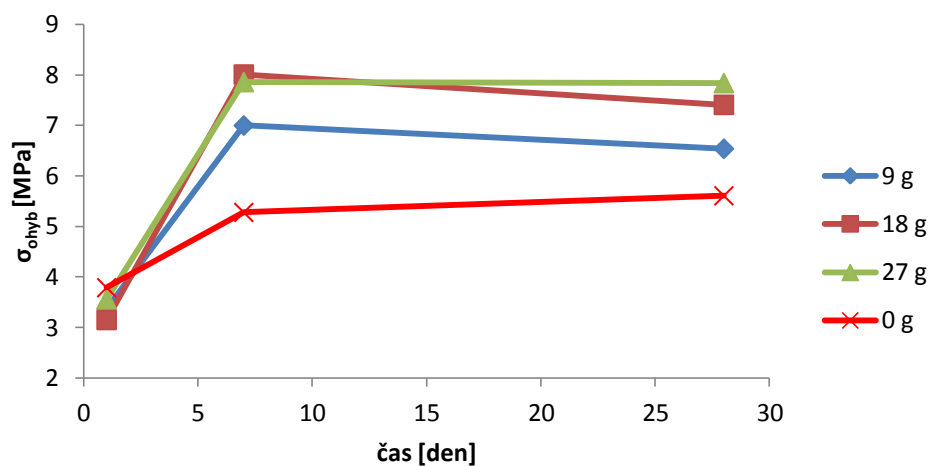
Obrázek 23: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přidavkem Dynamon SX-14



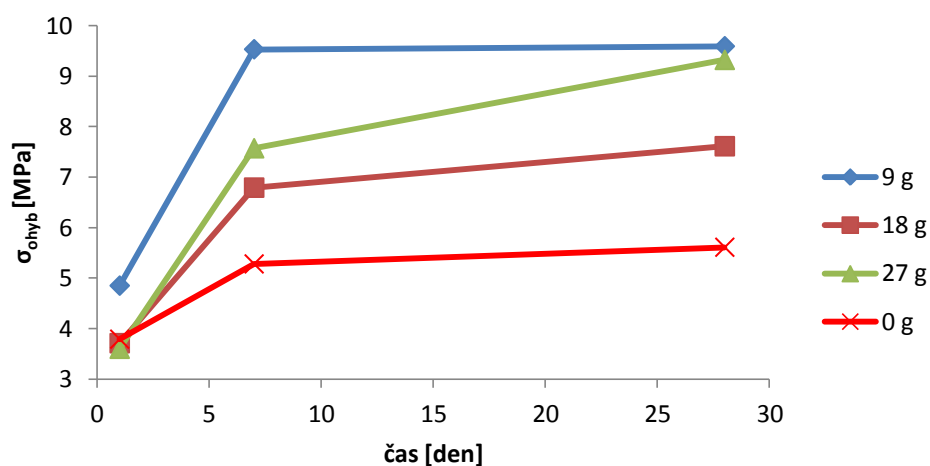
Obrázek 24: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přidavkem Fluid GT



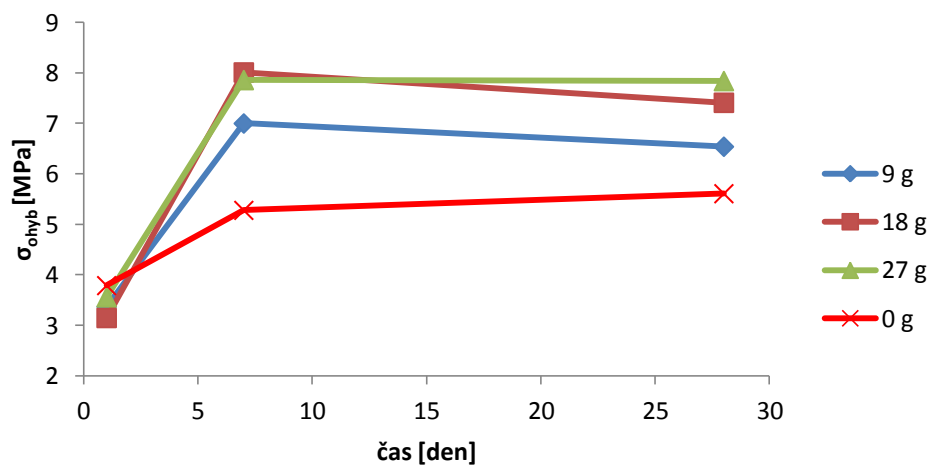
Obrázek 25: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přidavkem Fluid CE 40 W



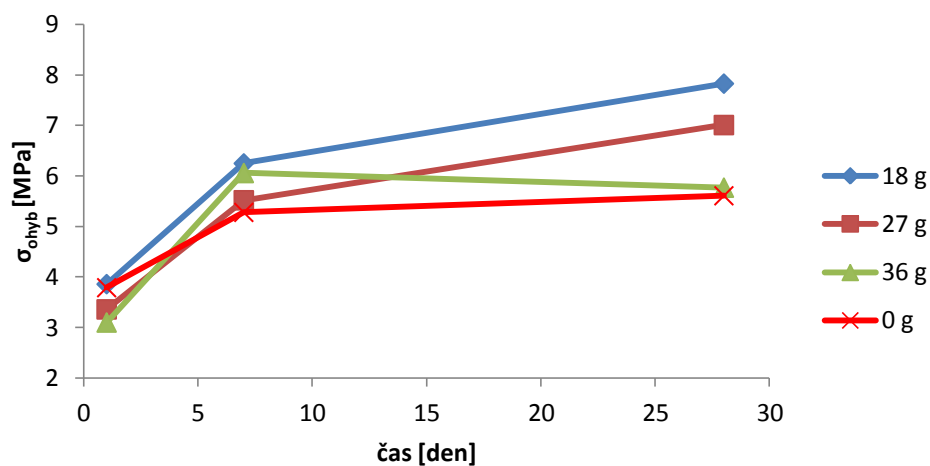
Obrázek 26: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přídavkem Plast 760



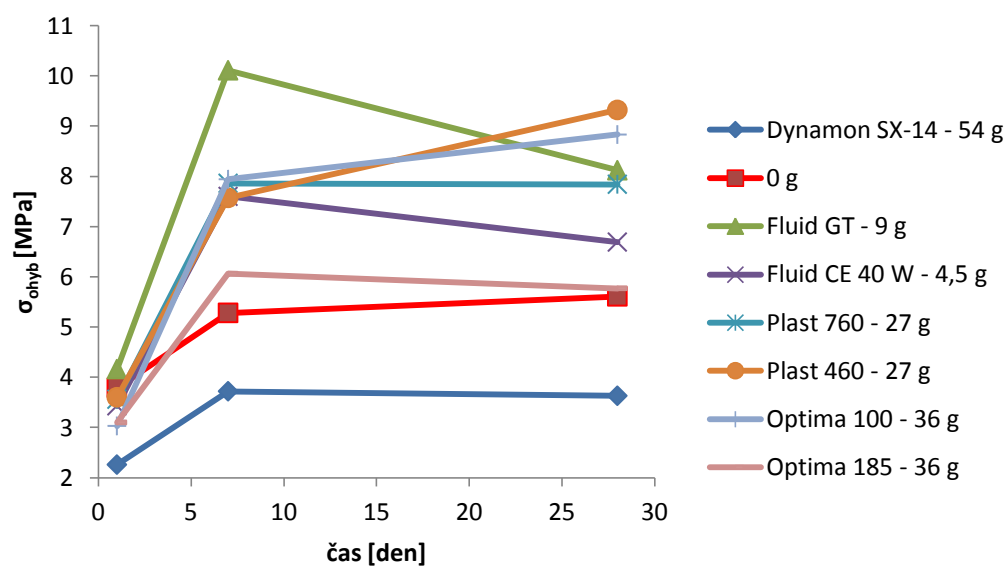
Obrázek 27: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přídavkem Plast 460



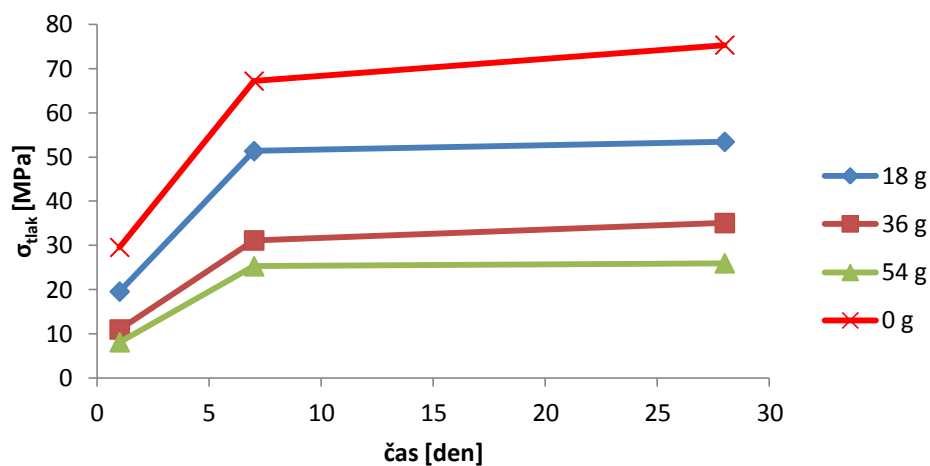
Obrázek 28: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přídavkem Optima 100



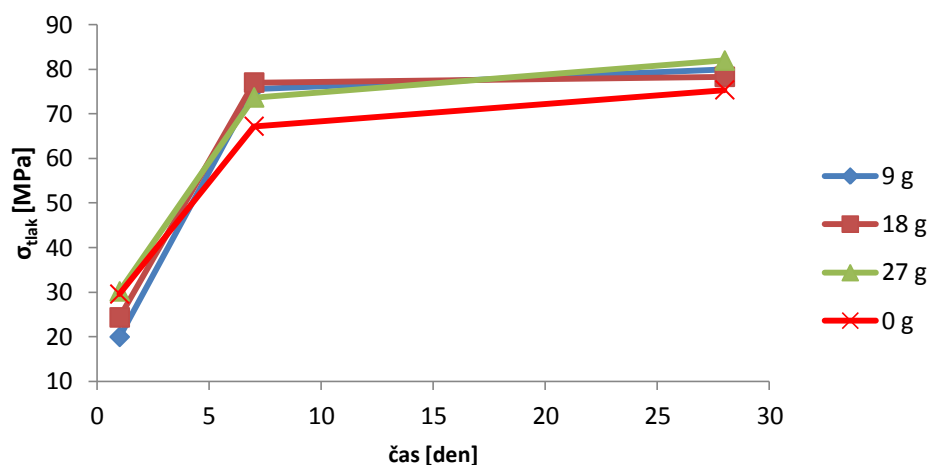
Obrázek 29: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přídavkem Optima 185



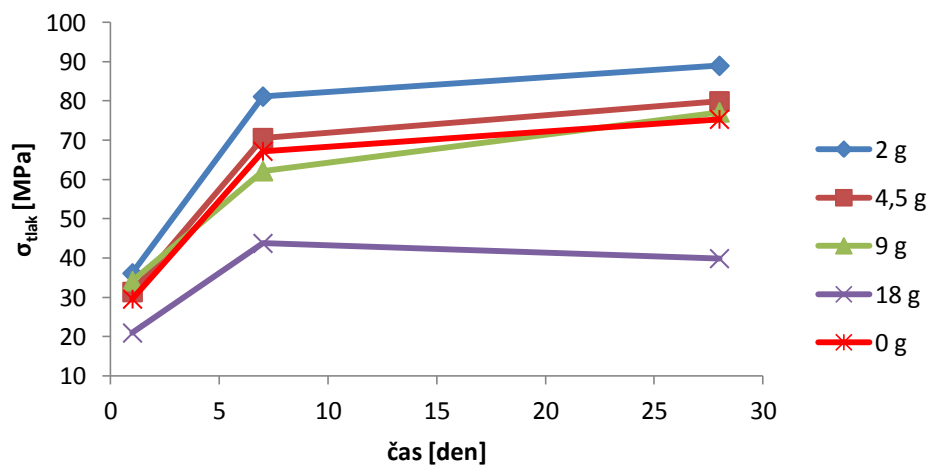
Obrázek 30: Vývoj pevností v tahu za ohybu geopolymerních omítek s přídavkem různých druhů superplastifikátorů ve svých nejvhodnějších koncentracích



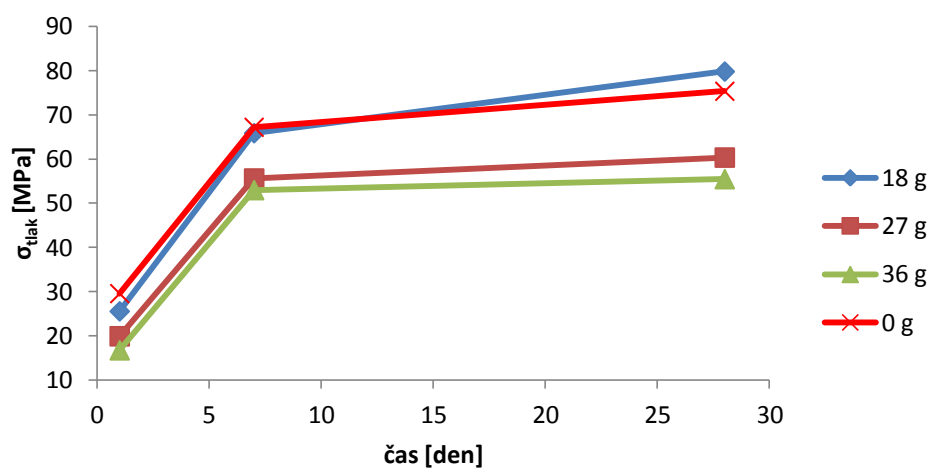
Obrázek 31: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přidavkem Dynamon SX-14



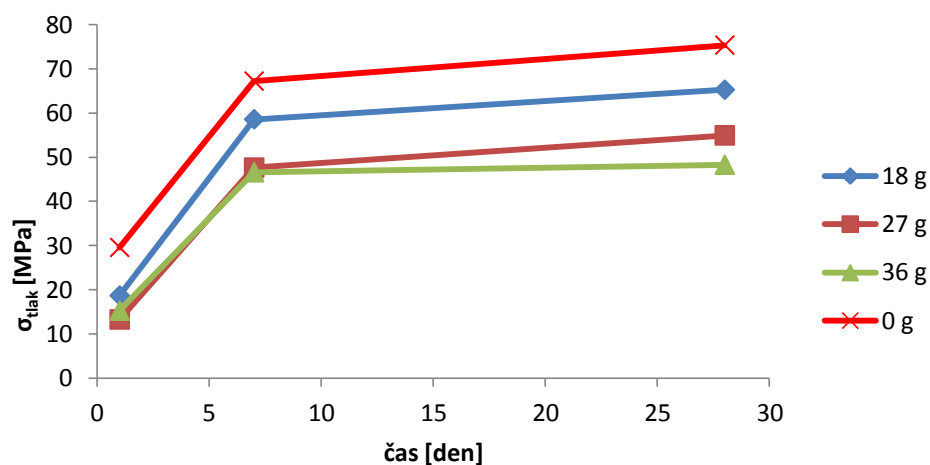
Obrázek 32: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přidavkem Fluid GT



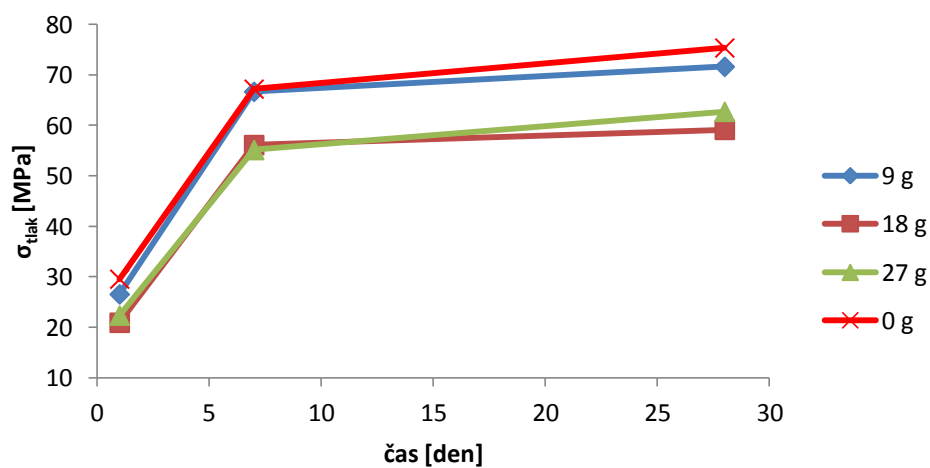
Obrázek 33: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přidavkem Fluid CE 40 W



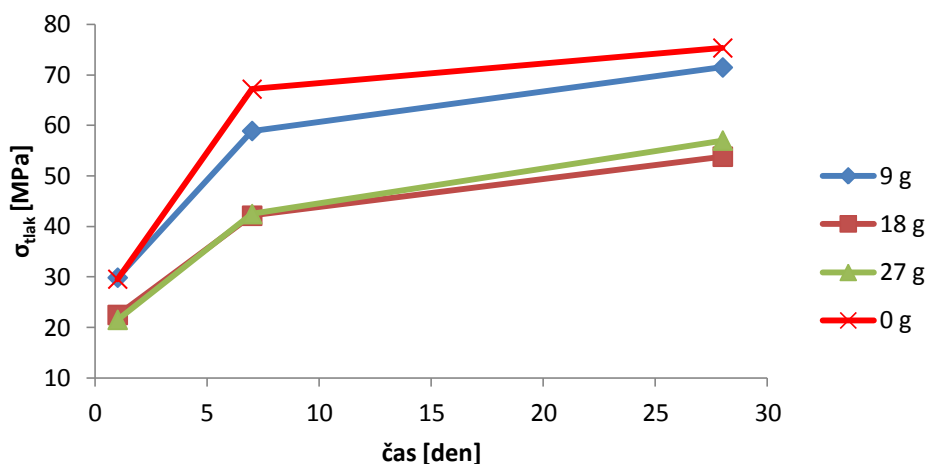
Obrázek 34: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přídavkem Optima 100



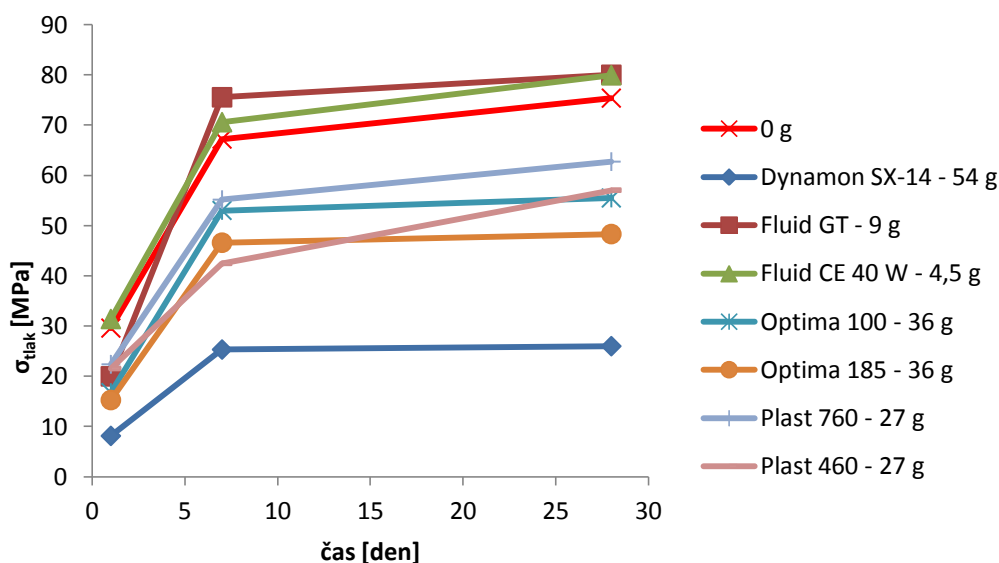
Obrázek 35: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přídavkem Optima 185



Obrázek 36: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přídavkem Plast 760



Obrázek 37: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přídavkem Plast 460



Obrázek 38: Vývoj pevností v tlaku geopolymerních omítek s přídavkem různých druhů superplastifikátorů ve svých nejvhodnějších koncentracích

Dle uvedených grafů pevností je patrné, že přídavek superplastifikátoru ovlivní pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku. Pevnosti v tahu za ohybu se po přidání superplastifikátoru v jakémkoliv množství zvýší, výjimkou je směs s Dynamon SX-14, u které došlo naopak ke snížení těchto pevností. U pevností v tlaku není tento trend jednoznačný, záleží na druhu použitého plastifikátoru i jeho množství. Avšak dalo by se říci, že s přídavkem SP se pevnosti v tlaku většinou snížily, nebo se nezměnily oproti referenčnímu vzorku bez přidání SP. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosáhl vzorek s přídavkem 2 g Fluid CE 40 W (88,96 MPa). Vzorek s přídavkem 36 g Optima 100 dosáhla sice jen 55,47 MPa, ale jeho přilnavost k povrchu i zpracovatelnost byla nejlepší ze všech vzorků.

3.4 Zpracovatelnost a nanášení omítek na podklad

Pro nanášení omítek na podklad byla určena známkovací stupnice od 1 do 5, kdy 1 = nejlepší, 5 = nejhorší. Omítky byly tímto způsobem hodnoceny hlavně mezi sebou navzájem. Hodnocena byla jednak přilnavost omítek k podkladu, ale také to, jak se s jednotlivými omítkami pracovalo, tedy převážně jak dobře se natahovaly. Jednotlivé poznatky jsou shrnuty v *Tabulce 4*.

Tabulka 4: Hodnocení jednotlivých směsí v rámci zpracovatelnosti a přilnavosti k povrchu

Označení směsi	Známkování směsi	Subjektivní popis chování omítkové malty během nanášení
I.	4	Reologické vlastnosti omítky bez přidání superplastifikátoru byly poměrně dobré, ale její přilnavost na podklad byla velice špatná.
II. A	3	Se zvyšujícím se množstvím SP se zlepšovala jak zpracovatelnost omítky, tak i její přilnavost k povrchu
II. B	2	
II. C	1	
III. A	1-	Reologické vlastnosti byly celkem dobré, přilnavost k povrchu se zlepšovala se snižujícím se množstvím SP.
III. B	2	
III. C	2-	
IV. A	2-	Zpracovatelnost těchto omítek byla obecně dobrá, avšak docházelo velmi rychle k zatuhnutí. Omítky byly všechny dost tekuté, ale jejich přilnavost na povrch byla velice špatná, snižovala se se zvyšujícím se množstvím SP.
IV. B	2	
IV. C	3	
IV. D	4	
V. A	1-	Omítky s přídavkem tohoto typu SP měly výbornou zpracovatelnost a také přilnavost k povrchu. Čím více SP, tím byly tyto vlastnosti lepší.
V. B	1	
V. C	1+	
VI. A	2+	Přilnavost těchto omítek byla tím lepší, čím více SP bylo do směsi dodáno.
VI. B	2	
VI. C	1-	
VII. A	2	Tento typ SP poměrně ztekucoval jednotlivé omítkové malty, jejich zpracovatelnost byla tedy výborná, jejich přilnavost k povrchu byla výborná jen u nejvyšší koncentrace.
VII. B	2	
VII. C	1	
VIII. A	2-	Omítky s přídavkem tohoto typu SP se chovaly obdobně jako směsi VI., jen přilnavost byla trochu horší.
VIII. B	2-	
VIII. C	1	

Po zatvrdnutí byly vyfoceny nanesené vzorky omítkových malt se všemi přidanými druhy SP v jejich neoptimálnější koncentraci. Tyto fotky jsou uvedeny na *Obrázcích 39 – 54*.



Obrázek 39, 40: Optima 100 (36 g)



Obrázek 41,42: Plast 760 (27g)



Obrázek 43,44: Optima 185 (36 g)



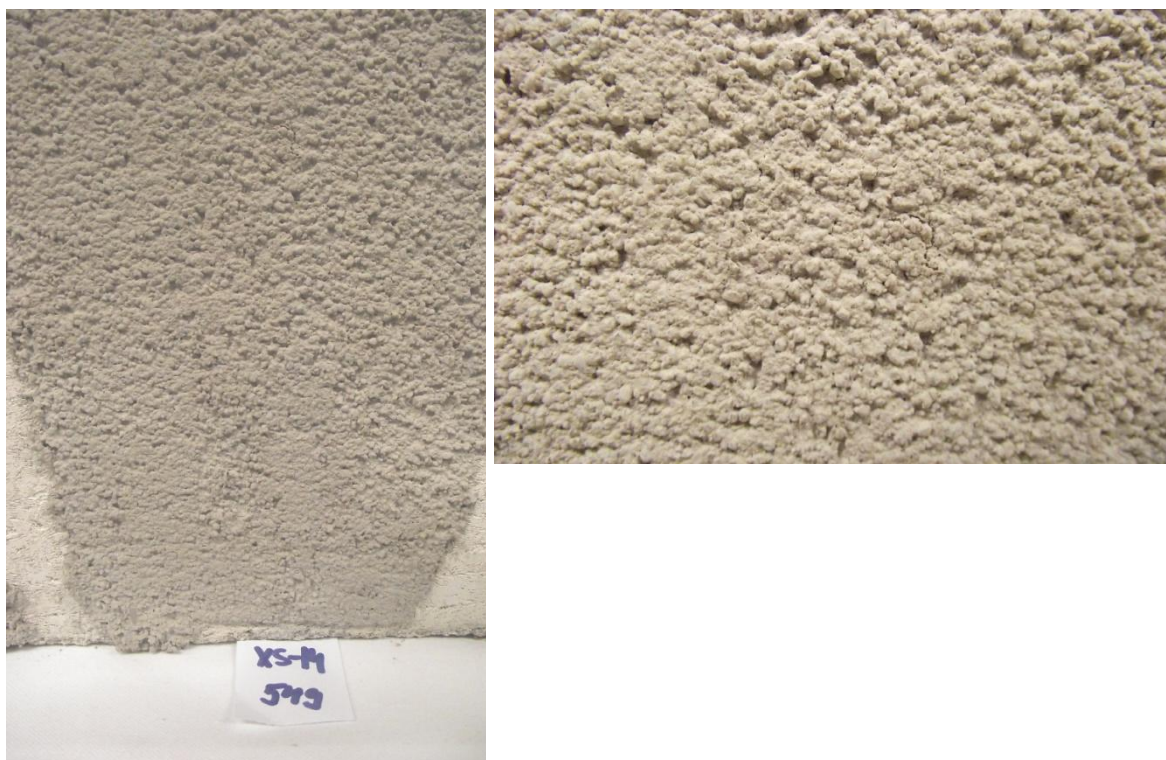
Obrázek 45, 46: Plast 460 (27 g)



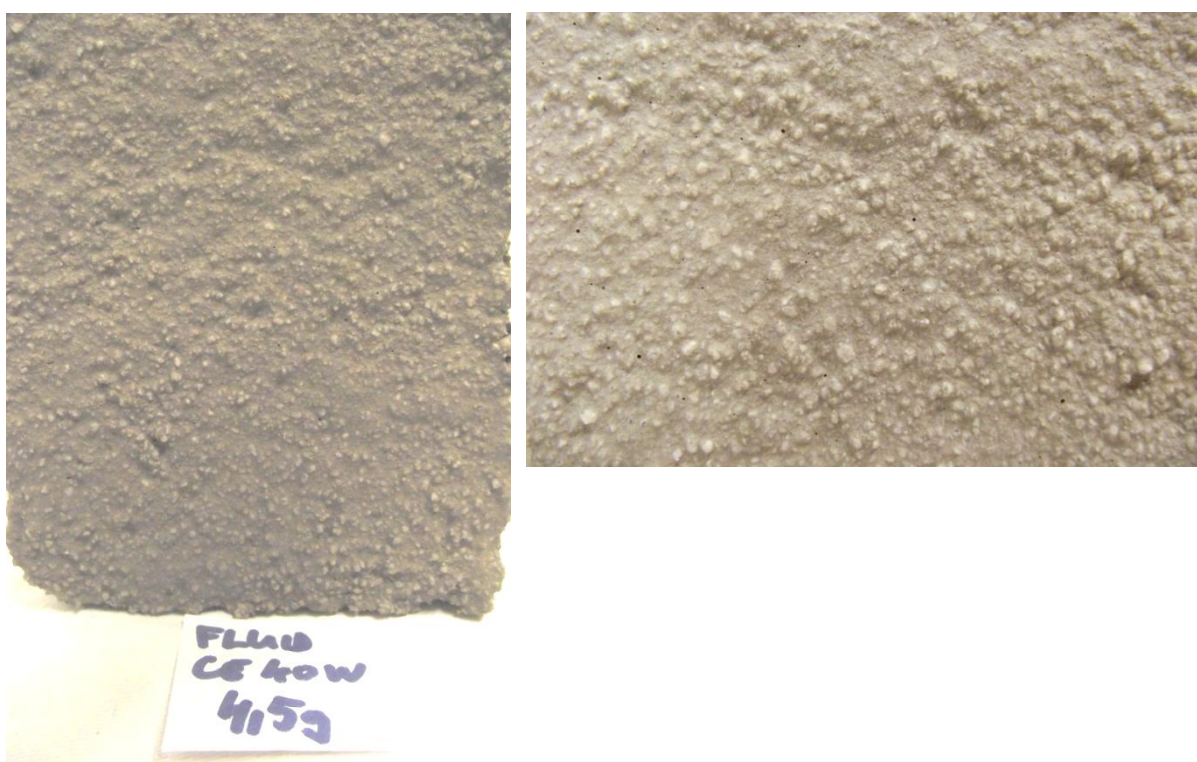
Obrázek 47, 48: Fluid GT (9 g)



Obrázek 49, 50: 0 g plastifikátoru



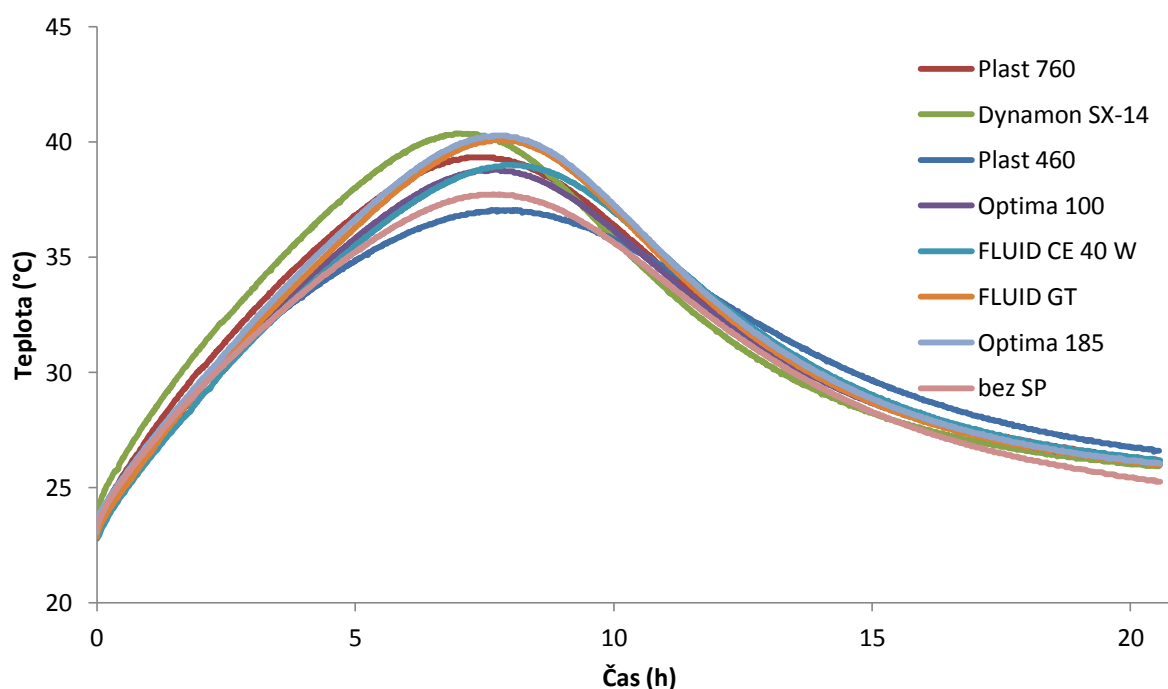
Obrázek 51, 52: Dynamon SX-14 (54 g)



Obrázek 53, 54: Fluid CE 40 W (4,5 g)

3.5 Stanovení vlivu superplastifikátoru na průběh tuhnutí a tvrdnutí geopolymerních past

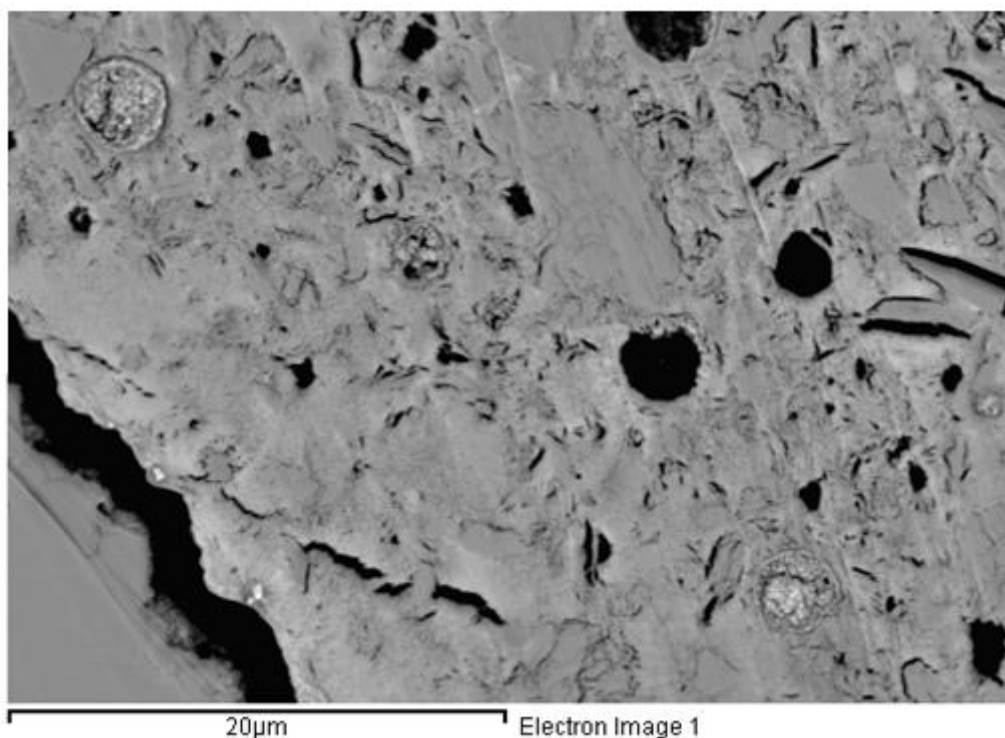
Tuhnutí a tvrdnutí geopolymerních past bylo pozorováno pomocí isoperibolické kalorimetrie. Touto metodou bohužel nelze stanovit přesný počátek tuhnutí a tvrdnutí, jako například u cementových směsí, ale díky záznamu vývoje tepla můžeme posoudit ovlivnění kinetiky tuhnutí. Tuto závislost nám popisuje právě *Obrázek 55*, ze kterého je zjevné, že průběh křivek tuhnutí a tvrdnutí se navzájem příliš neliší. Křivky dosahují svého maxima téměř za stejnou jednotku času, tedy asi po 7 až 8 hodinách od namíchání směsi. Lehce se liší také teplota, při níž dosahují křivky svého maxima, tedy od 37 do 40 °C. Samotný průběh vytvrzovací reakce směsi s přidavkem superplastifikátoru a bez něj je obdobný. Z těchto výsledků lze usoudit, že superplastifikátory přidané do geopolymerních omítkových směsí nijak zvlášť neovlivňují kinetický průběh jejich tuhnutí a tvrdnutí.



Obrázek 55: Kalorimetrické křivky připravených omítkových pojiv

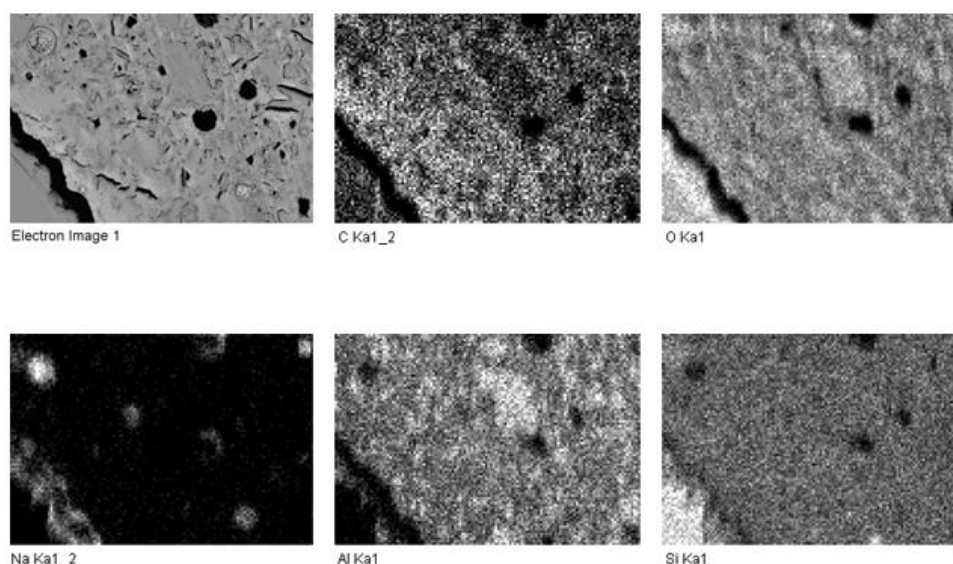
3.6 Určení struktury a prvkové složení geopolymerního betonu s přidavkem superplastifikátoru Optima 100

Na vybrané ploše vzorku s přidavkem 3 %_{hm.s} SP Optima 100 byla provedena EDX prvková analýza. Na *Obrázku 56* je zobrazen iontově leštěný výbrus zobrazený elektronovým mikroskopem, na kterém jsou patrná zrna nezreagovaného metakaolinu obklopená pojivovou fází geopolymerního betonu. V levém dolním rohu se nachází zrno písku, kolem kterého se šíří trhlinka. Nelze s jistotou říci, zda tato trhlinka vznikla při tvrdnutí pojiva, nebo v důsledku manipulace se vzorkem, případně vlivem vakua elektronového mikroskopu.



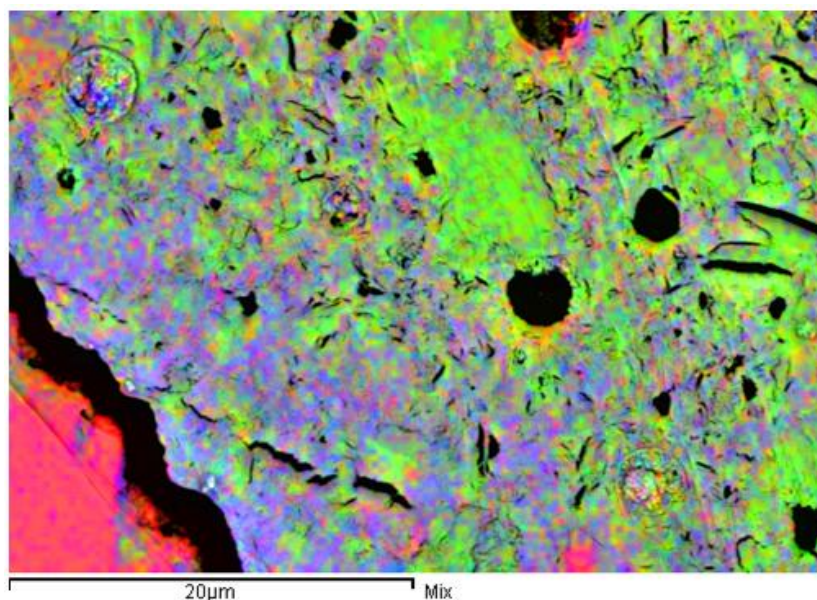
Obrázek 56: Výbrus vzorku s přidavkem 3 %_{hm} s superplastifikátoru Optima 100

EDX prvková analýza byla provedena pro zjištění rozložení SP ve vzorku. Na *Obrázku 57* je zobrazena četnost zastoupení vybraných prvků. Uhlík je rovnoměrně rozložen v celé pojivové fázi. Lze tedy usoudit, že SP nereaguje s žádnou fází přednostně. Rozložení ostatních prvků, tedy křemíku, hliníku a kyslíku nám ukazuje rozložení pojivové fáze, zrn nezreagovaného metakaolinu a písku. Sodík se hojně vyskytuje v jednotlivých mikropórech a v trhlině okolo pískového zrna. Pravděpodobně dochází ke tvorbě výkvětů v mikropórech a také dochází k alkalicko-křemičité reakci na povrchu pískových zrn.

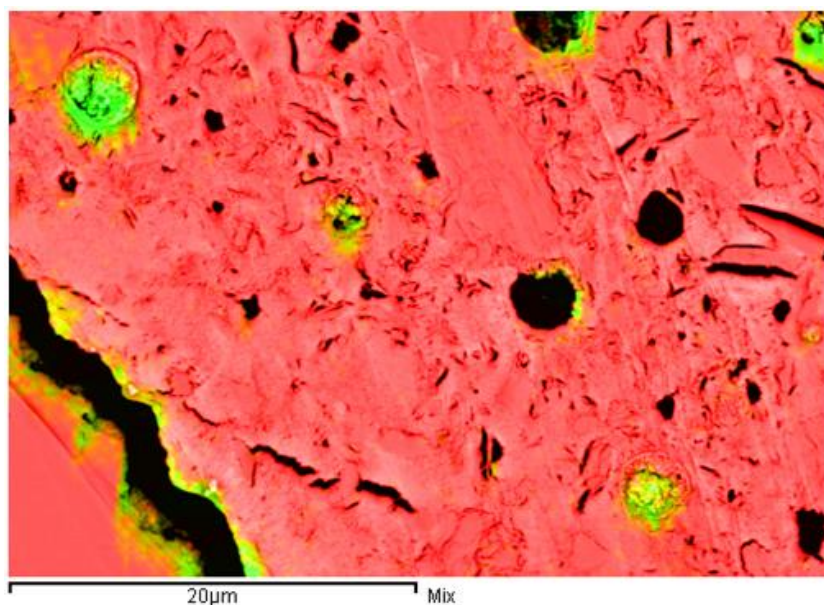


Obrázek 57: Rozložení C, O, Na, Al a Si ve vzorku s přidavkem 3 %_{hm} s Optima 100

Na *Obrázcích 58 a 59* pak můžeme vidět rozložení jednotlivých prvků společně.



Obrázek 58: Rozložení Si (červená), Al (zelená) a C (modrá) ve vzorku s přísávkem 3 %_{hm} s superplastifikátorem Optima 100

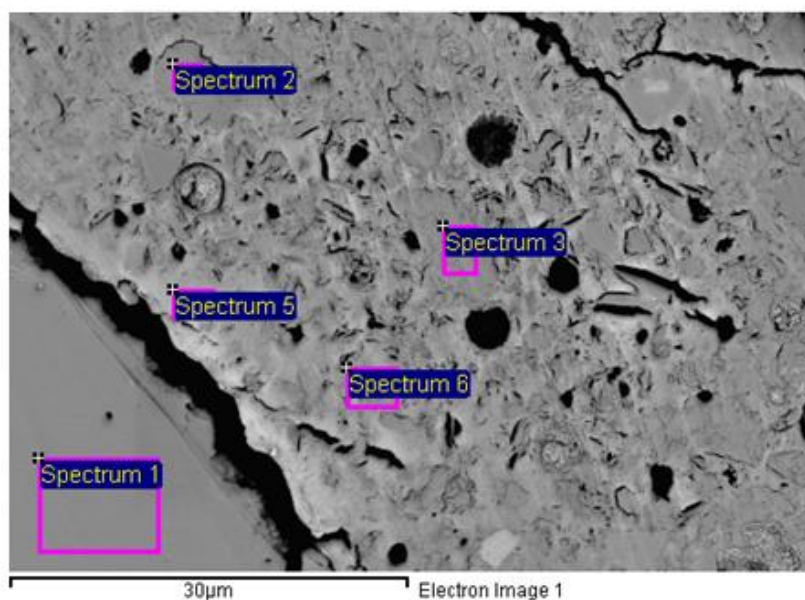


Obrázek 59: Rozložení Si (červená) a Na (zelená) ve vzorku s přísávkem 3 %_{hm} s superplastifikátorem Optima 100

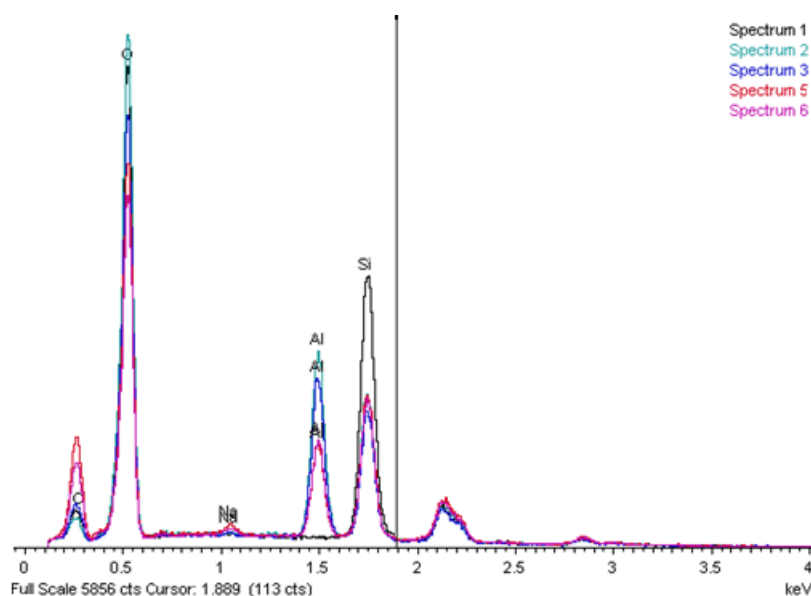
Nakonec bylo určeno přesné složení jednotlivých fází plochy výbrusu. Konkrétní složení je uvedeno v *Tabulce 5*. *Obrázek 60* vyobrazuje místa, na kterých byla EDX prvková analýza provedena a *Obrázek 61* vyjadřuje grafické zobrazení výskytu jednotlivých prvků v různých místech výbrusu.

Tabulka 5: Procentuelní složení spekter

Spektrum	C [%]	O [%]	Na [%]	Al [%]	Si [%]	fáze
1	4,73	47,90	-	-	47,37	Písek
2	3,00	47,74	-	22,92	26,34	Metakaolin
3	5,80	46,10	-	22,23	25,87	Metakaolin
4	15,47	42,36	0,88	12,8	28,48	Geopolymerní fáze
5	13,61	41,54	0,70	14,41	29,73	Geopolymerní fáze



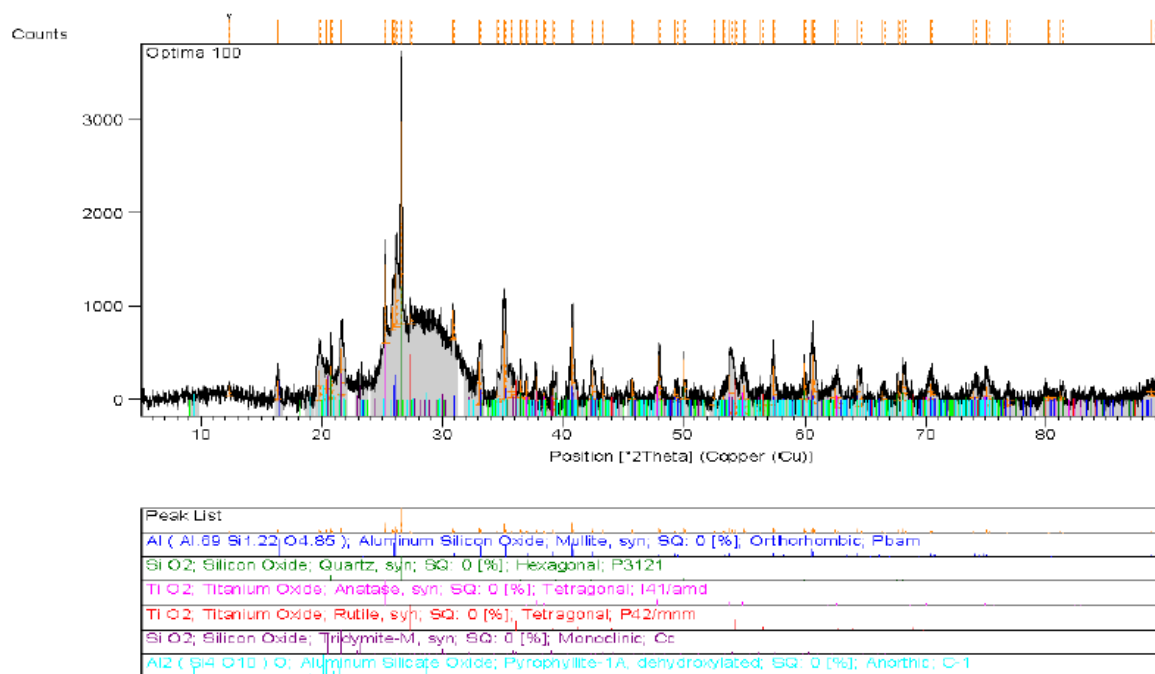
Obrázek 60: Vyobrazení míst provedených prvkových analýz na vzorku s přidavkem 3 %_{hm} s superplastifikátorem Optima 100



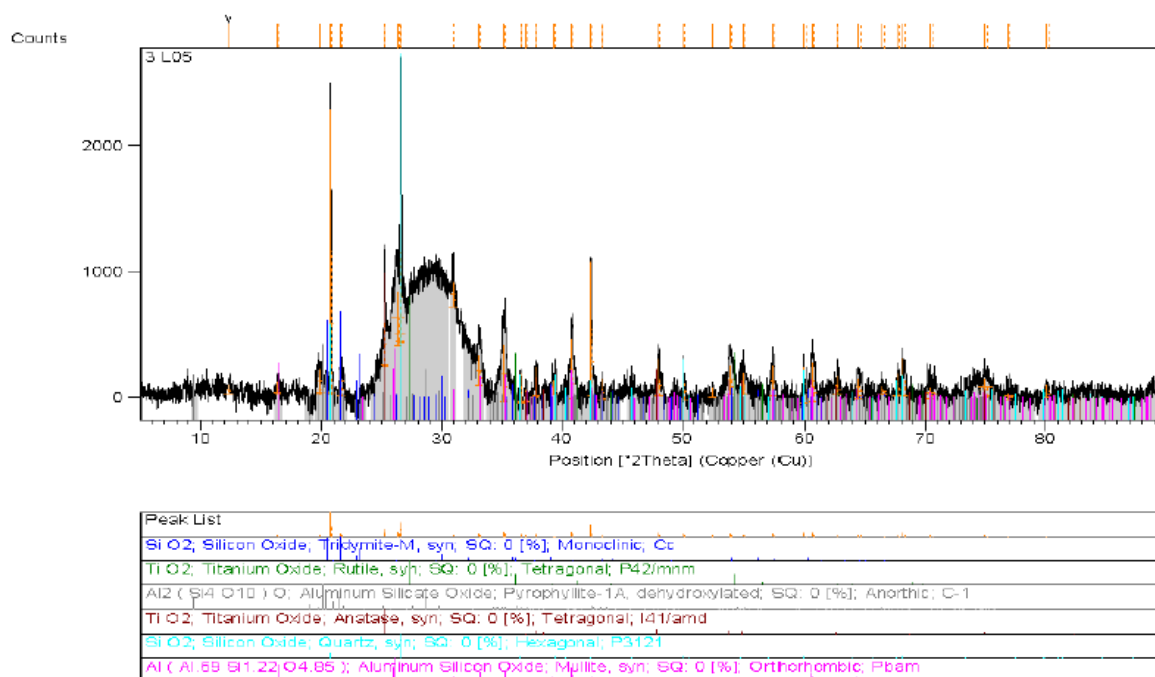
Obrázek 61: Grafické zobrazení výskytu jednotlivých prvků v různých místech výbrusu na vzorku s přidavkem 3 %_{hm} s superplastifikátorem Optima 100

3.7 Rentgenová difraktometrie geopolymerní pasty s superplastifikátorem Optima 100

EDX analýzou byl zjištěn výskyt sodných kationtů převážně v mikropórech geopolymerního betonu. S velkou pravděpodobností se jedná o výkvěty uhličitanu sodného. Jedná se o krystalickou látku, která lze analyzovat pomocí rentgenové difrakční analýzy. Rentgenogram (Obrázek 62) zobrazuje složení krystalických fází vzorku geopolymerního pojiva s 2,5 %_{hm} z PF+VS SP Optima 100, který obsahuje mulit, oxid křemičitý, anatas, tridymit, rutil, pyrofylit. Při tuhnutí nedochází ke vzniku ani zániku nových fází, protože se shodují s rentgenogramem metakaolinu Mefisto L 05 (Obrázek 63), který byl použit jako vstupní surovina. Tento aspekt potvrdil, že celý reakční proces je pouze záležitostí amorfní fáze pojiva.



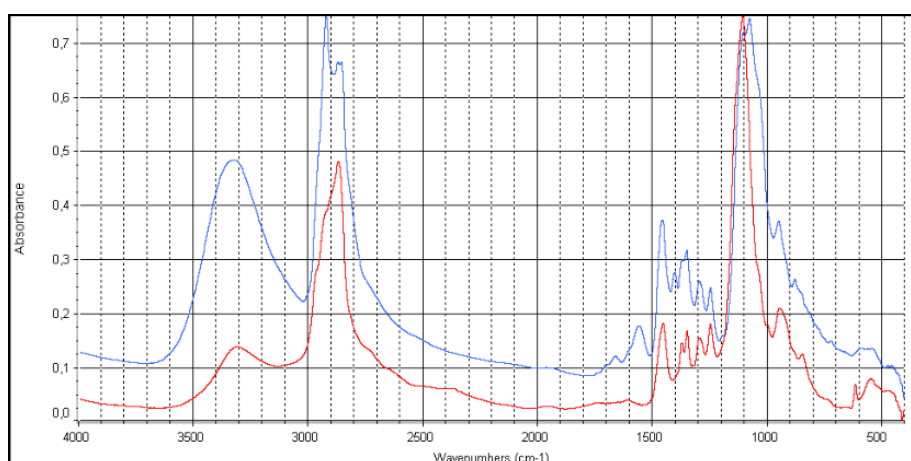
Obrázek 62: XRD spektrum geopolymerní pasty s přídavkem 2,5 %_{hm} z PF+VS Optima 100



Obrázek 63: XRD spektrum metakaolinu L 05

3.8 Infračervená spektrometrie vyluhovaného superplastifikátoru Optima 100

U zatvrdlé pasty s přídavkem 2,5 %_{hm} z PF+VS Optima 100 byl udělán acetonový výluh, který byl také podroben infračervené spektrometrii. Byla zde pozorována hlavně změna struktury samotného plastifikátoru. Spektrum je vykresleno na Obrázku 64, kde je možno ho porovnat i s původním spektrem Optima 100 (červené spektrum). Hned na první pohled jsou patrné změny v jeho struktuře. Přibýlo zde několik píků, které mohou patřit acyklickým vazbám $-\text{CH}_2-$, ketonům $\text{H}_3\text{C}-\text{CO}-$, $-\text{COOH}$ skupinám, polyenům, vinylesterům $\text{CH}_2=\text{CHOCOR}$ či vinyldienům. Tyto strukturní změny vznikly pravděpodobně vlivem vysokého pH v geopolymerních omítkách, původní struktura polyethylenoxidu však zůstala zachována.



Obrázek 64: Porovnání infračerveného spektra Optima 100 a acetonového výluhu Optima 100 ze vzorku s přídavkem 2,5 %_{hm} s+VS Optima 100

4 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce byla příprava tenkovrstvých omítek z alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů s vhodnými modifikátory reologie, dále pak stanovit jejich vliv na zpracovatelnost a mechanické vlastnosti a také charakterizovat strukturu vytvrzených omítek. Jako modifikátory reologie byly vybrány superplastifikátory, které se hojně využívají ke zlepšení zpracovatelnosti cementových past, čímž zároveň snižují množství záměsové vody.

Nejprve byly namíchány omítkové malty s přidavkem různých druhů superplastifikátorů. Jejich množství bylo voleno dle chování malty s přidavkem 3 %_{hm.s} daného superplastifikátoru. Buď bylo množství zvyšováno, nebo naopak snižováno. Voda byla do směsi přidávána dle aktuální potřeby. U namíchaných omítkových malt bylo hodnoceno nanášení a přilnavost na podkladu. V tomto ohledu se nejlépe osvědčily malty s přidavkem superplastifikátoru Fluid Optima 100 (polyethylenoxid s fosfátovými skupinami), konkrétně s přidavkem 36 g, tedy 6 %_{hm.s}. Dobré vlastnosti vykazovaly i malty s přidavkem Fluid Optima 185 (polyethylenoxid, dle výrobce polykarboxylát a polyfosfát).

Vzhled jednotlivých omítek natažených na podklad se vzájemně příliš neměnil. Rozdíly byly pouze v jejich barevných odstínech, které byly ovlivněny typem použitého superplastifikátoru.

Zkoušky mechanických vlastností byly dělány na zkušebním pracovišti DESTTEST 3310. Pevnosti všech namíchaných omítkových malt byly vysoké. Nejvyšších pevností v tahu za ohybu po 28 dnech dosahoval vzorek omítky s přidavkem 3 %_{hm.s} Fluid GT (polymelaminový superplastifikátor s obsahem sulfoskupin). Hodnota této pevnosti byla 11,62 MPa. Nejvyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech, které činily 88,96 MPa, charakterizovaly superplastifikátor Fluid CE 40 W o množství 0,33 %_{hm.s} (polynaftalen s obsahem sulfoskupin). Optima 100 (3 %_{hm.s}) měla po 28 dnech pevnosti v tahu za ohybu 8,83 MPa a 55,47 MPa. U pevností v tahu za ohybu se obecně vyskytoval trend, že s přidáním superplastifikátoru se pevnosti oproti referenčnímu vzorku (bez přidavku superplastifikátoru) zvýšily. Co se týče pevností v tlaku, ty se s přidavkem superplastifikátoru většinou snížily, nebo zůstaly stejné.

Grafy z isoperibolické kalorimetrie ukázaly, že přidavek 2,5 %_{hm.S+VS} superplastifikátoru nemá na tuhnutí a tvrdnutí významný vliv. Všechny křivky měly obdobný průběh jako křivka referenčního vzorku bez přidavku superplastifikátoru.

Struktura omítky byla zkoumána pouze u vzorku s přidavkem Optima 100 v množství 3 %_{hm.s}. Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu ukázaly, že vlastní struktura geopolymerní fáze je kompaktní. Důležité také bylo zjištění, že superplastifikátor (polykarboxylát) je homogenně rozmístěn po celé pojivové fázi.

Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu poukazovaly na možný výskyt výkvětů v podobě uhličitanu sodného. Jeho přítomnost se však díky rentgenové difrakční analýze nepráškových vzorcích nepotvrdila.

Pro zjištění případných strukturních změn superplastifikátoru v geopolymerním betonu byl udělán acetonový výluh, a to opět ze vzorku s přidavkem 2,5 %_{hm.S+VS} Optima 100. Infračervená spektroskopie výluhu ukázala, že pravděpodobně vlivem vysokého pH v geopolymerní maltě došlo ke strukturním změnám v molekule superplastifikátoru Optima 100.

Shrnutí této bakalářské práce je takové, že superplastifikátory znatelně ovlivňují reologické vlastnosti geopolymerních betonových past. Některé svou přítomností v geopolymerních

betonových pastách způsobí jejich snadnější nanášení a lepší přilnavost k povrchu. Jedná se hlavně o superplastifikátory na bázi polykarboxylátů. Konkrétně pak o Optima 100 a Optima 185, což jsou dle výrobce či výsledků z infračervené spektrometrie polyethylenoxidy obohacené o fosfátové skupiny. Velice důležitý je i fakt, že přídavek zkoumaných superplastifikátorů negativně neovlivňuje mechanické vlastnosti zatvrdlých omítek.

V budoucnu by se výzkum těchto geopolymerních omítek mohl zaměřit na zlepšení dávkování vybraných typů superplastifikátorů, nebo na ovlivnění barevnosti jak pojivové fáze, tak i plniva.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠOUKAL, F.; OPRAVIL, T.; PTÁČEK, P.; FOLLER, B.; BRANDŠTETR, J. Geopolymers-amorphous ceramics via solution. *In Some thermodynamic, structural and behavioral aspects of materials accentuating non-crystalline states*; Pilsen 2009. Plzeň, CZ, OPS Nymburk. 2009. p. 556 - 584. ISBN 978-80-87269-06-0.
- [2] DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions*. ISBN 2-9514828-0-0.
- [3] ŠRÁMKOVÁ, E.: *Příprava historických geopolymérů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2008. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Havlica, CSc.
- [4] DĚDEČKOVÁ, Lenka. Geopolymery: Cesta od pyramid k mostům. *21. STOLETÍ* [online]. 2010, 22-12-2010 [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/blog/2010/12/22/geopolymery-cesta-od-pyramid-k-mostum/>
- [5] Geopolymer Institute: Potential utilization for geopolymer composites materials. *Geopolymer Institute* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.geopolymer.org/applications/potential-utilization-for-geopolymer-composites-materials>
- [6] ZHANG, Shuzheng, Kecheng GONG a Jianwen LU. Novel modification method for inorganic geopolymer by using water soluble organic polymers. *Materials Letters* [online]. 2004, roč. 58, 7-8, s. 1292-1296 [cit. 2012-03-11]. ISSN 0167577X. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.07.051. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X03007651>
- [7] BARTOŇOVÁ, P.: *Příprava a vlastnosti ryzích geopolymérů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [8] PROVIS, John L., Grant C. LUKEY a Jannie S. J. VAN DEVENTER. Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chemistry of Materials* [online]. 2005, roč. 17, č. 12, s. 3075-3085 [cit. 2012-04-28]. ISSN 0897-4756. DOI: 10.1021/cm050230i. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm050230i>
- [9] DUXON, P. a A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ. Geopolymer technology: the current state of the art. *Jurnal of Materials Science* [online]. 42, 2917-2933, 19. 12. 2006 [cit. 2012-01-09]. DOI: 10.1007. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/x1p0216567487w12/export-citation/>
- [10] DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer: chemistry*. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymère, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9
- [11] SVIDROŇOVÁ, B. *Mozaikové geopolymerní tenkovrstvé omítky pro dekorativní aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [12] *Přehled minerálů a hornin*. [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pdf/js07/mineraly/materialy/mineraly/silikaty.html>
- [13] myscoutchemistry.files.wordpress.com/2008/07/polisialat.jpg [online]. [cit. 2012-04-28].
- [14] KALINA, Lukáš. *Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-03-14].

- Dostupné z:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=44531.
 Zkrácená verze doktorské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
 Vedoucí práce Jaromír Havlica.
- [15] ŠKVÁRA, František. Alkali activated materials or geopolymers?. *Journal Ceramics-Silikáty* [online]. 2007, 173-177 [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: http://www.ceramics-silikaty.cz/2007/pdf/2007_03_173.pdf
- [16] VAN DEVENTER, J.S.J., J.L. PROVIS, P. DUXSON, G.C. LUKEY a Alejandro LOPEZ-VALDIVIESO. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2007, roč. 139, č. 3, s. 506-513 [cit. 2012-03-11]. ISSN 03043894. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.044. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389406002081>
- [17] JEVICKÁ, L. *Příprava geopolymerních pojiv pro inhibici toxických prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [18] XU, Hua a J.S.J. VAN DEVENTER. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. [online]. [cit. 2012-03-24]. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751699000745>
- [19] *Bauhaus-Universität Weimar* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.uni-weimar.de/cms/index.php?id=109&L=1>
- [20] VILLA, C., E.T. PECINA, R. TORRES, L. GÓMEZ a Alejandro LOPEZ-VALDIVIESO. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, roč. 24, č. 11, s. 2084-2090 [cit. 2012-03-11]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181000173X>
- [21] HANYKÝR, Vladimír ; KUTZENDÖRFER, Jaroslav . *Technologie keramiky*. Druhé opravené vydání. 2002. 287 s. ISBN 80-900860-6-3.
- [22] HLAVÁČ, Jan. *Chemická technologie silikátů II : Keramika*. 1966. 150 s.
- [23] RAO, Feng, Francisco J. RAMIREZ-ACOSTA, Regina J. SANCHEZ-LEIJA, Shaoxian SONG a Alejandro LOPEZ-VALDIVIESO. Stability of kaolinite dispersions in the presence of sodium and aluminum ions. *Applied Clay Science* [online]. 2011, roč. 51, 1-2, s. 38-42 [cit. 2012-04-28]. ISSN 01691317. DOI: 10.1016/j.clay.2010.10.023. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131710003510>
- [24] MAGRLA, R. *Náhrada strusky ve směsných cementech*. Brno, 2010, 62 s. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. MARCELA FRIDRICHOVÁ, CSc
- [25] Vliv alkalického aktivátoru na rychlost tvorby pevné struktury alkalicky aktivovaných aluminosilikátů: http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/3tlv/TL06CZ_1132-8.pdf. *CIDEAS* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/3tlv/TL06CZ_1132-8.pdf
- [26] KIZLINK, Juraj. *Technologie chemických látek a jejich využití: fundamentals, technology, and practice*. 4., přeprac.a dopl. vyd. Bratislava: VUTIUM, 2011, 546 s. ISBN 978-80-214-4046-3.

- [27] ČERVINKA, Josef. *Geopolymery - využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů* [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29938/1/CervinkaJ_Geopolymery_RT_2008.pdf. f. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování. Vedoucí práce Renata Tišlová, Karol
- [28] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 471 s. ISBN 80-807-6007-1.
- [29] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: Materiály, koroze, sanace*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1999, 112 s. ISBN 80-708-0347-9. [30] ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv I*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 150 s. ISBN 80-708-0224-3.
- [31] BROCKEN, Harold a Timo G. NIJLAND. White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks. *Construction and Building Materials* [online]. 2004, roč. 18, č. 5, s. 315-323 [cit. 2012-03-12]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.02.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061804000285>
- [32] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky: chemické a technologické vlastnosti*. 1. vyd. Praha: STOP, 2002, 89 s. ISBN 80-866-5700-0.
- [33] ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv II: užití maltovin. Koroze cementu*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1995, 184 s. ISBN 80-708-0225-1.
- [34] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton: fundamentals, technology, and practice*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. ISBN 80-867-6939-9.
- [35] RAY, I. a A. P. GUPTA. Effect of Latex and Superplasticiser on Portland Cement Mortar in the Hardened State. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1995, 15(1), 9-21 [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894659595756P>
- [36] SVOBODA, Pavel. *Stavební technologie: Stavební řemesla a technologie*. [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.stavebnitechnologie.cz/view.php?cislocclanku=2002033101>
- [37] ŠILER, P. *Studium vlivu chemických modifikujících přísad a příměsí na vlastnosti vysokohodnotných betonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 130 s. Školitel doc. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [38] LIUFU, S, H XIAO a Y LI. Adsorption of cationic polyelectrolyte at the solid/liquid interface and dispersion of nanosized silica in water. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2005-05-01, roč. 285, č. 1, s. 33-40 [cit. 2012-04-19]. ISSN 00219797. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.11.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021979704011336>
- [39] SPIRATOS, N. *Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology, and practice*. 1. vyd. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2003, 322 s. ISBN 0-9731507-1-8.
- [40] COLLEPARDI, Mario. *The new concrete: užití maltovin. Koroze cementu*. 1. vyd. S.l.: Grafiche Tintoretto, 2006, 421 s. ISBN 88-901-4694-X.
- [41] KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. druhé, upravené a doplněné vydání. Ostrava : 2003. 132 s. ISBN 80-86369-07-2.
- [42] *CHEMPOINT: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/>

- [43] BRANDŠTETR, J, J. POLCER, J. KRÁTKÝ, R. HOLEŠINSKÝ a J. HAVLICA. Possibilities of the use of isoperibolic calorimetry for assessing the hydration behavior of cementitious systems. *Cement and Concrete Research* [online]. 2001, roč. 31, č. 6, s. 941-947 [cit. 2012-04-27]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00495-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601004951>